

N2000-tarkkavaaitushanke Tuusulan kunnassa

Matias Rinta

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikan ja liikenteen ala
Maanmittaustekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Matias Rinta	Vuosi	2016
Ohjaajat	Jukka Hakala Pasi Laurila		
Toimeksiantaja	Destia Oy		
Työn nimi	N2000-tarkkavaaitushanke Tuusulan kunnassa		
Sivumäärä	57		

Tämä opinnäytetyö jakautuu kahteen osaan. Ensimmäisessä osiossa kerrotaan vaaituksesta geodeettisena mittausmenetelmänä ja esitellään yleisimmät vaaituskojeet. Siinä kerrotaan myös vaaitukseen olennaisesti liittyvistä korkeusjärjestelmistä ja niiden perustasta. Toisessa osiossa käsitellään tarkkavaaitushanketta, jonka seurauksena Tuusulan kunta siirtyi käyttämään N2000-korkeusjärjestelmää. Siinä annetaan yleiskuvaus tarkkavaaitustyöstä, sen etenemisestä ja mahdollisista ongelmatilanteista. Lisäksi kerrotaan vaaitusverkon oikeanlaisesta suunnittelusta ja tasoituslaskentaprosessista. Verkon tasoitustapana käytettiin pienimmän neliösumman menetelmää.

Opinnäytetyön tietopohjana käytettiin sekä maanmittausalan kirjallisuutta että sähköisiä lähteitä. Lisäksi käytettiin alan asiantuntijoiden luentomateriaaleja. Osana tasoituslaskentaa saatiin myös hieman koulutusta sen suorittamiseen verkkotasoitushjelmalla.

Tuusulan tarkkavaaitushankkeen lopputuloksena saatiin uusi, tasalaatuinen N2000-korkeuspisteverkko, joka täyttää sille asetetut tarkkuusvaatimukset. Hankkeen kaikki vaiheet etenivät sujuvasti ja ilman suurempia ongelmia.

Johtopäätökseksi saatiin, että tarkkavaaitus on ensisijainen korkeusrunkomittausmenetelmä ja verkon suunnittelu sekä sen tasoitus ovat merkittävässä roolissa korkeusrunkomittauksia tehdessä. Vaaitusverkkojen suunnittelu ja toteuttaminen vaativat erityistä tietotaitoa ja ymmärrystä geodeettista mittauksista ja tasoituslaskennasta.

Asiasanat

N2000, pienimmän neliösumman menetelmä, tarkkavaaitus, tasoituslaskenta

Technology, Communication and Transport
Degree Programme of Land Surveying
Bachelor of Engineering

Author	Matias Rinta	Year	2016
Supervisors	Jukka Hakala Pasi Laurila		
Commissioned by	Destia Ltd		
Subject of thesis	Precision Levelling Process to N2000 System in the Municipality of Tuusula		
Number of pages	58		

The thesis is divided into two parts. In the first part levelling as a measurement method was introduced. In addition the most common levels and height systems were included. In the second part of the thesis, the precision levelling process in the municipality of Tuusula was presented. In this part the stages of the precision levelling process, planning of the levelling grid and the levelling calculation were described. At this precision levelling process, the least squares adjustment was used.

The theoretical basis of this thesis comprised a literature research. Furthermore, the electronic sources and the handouts of the experts in the field were used. Some training was received for the levelling calculation performed with the software. The description about the levelling process was based on the authors' own experience.

As the result of the levelling calculation a new, homogeneous N2000 level was formed in the destination. All the stages of the precision levelling went according to the plan and the accuracy of the results was acceptable with the requirements. The conclusion of this thesis was that the precision levelling is recommended when the height frame points are measured. In addition it is important to pay attention to the planning and calculation of the levelling grid.

Key words precision levelling, N2000, levelling calculation, least squares adjustment

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	KORKEUSJÄRJESTELMÄT	9
2.1	Ortometrinen ja ellipsoidinen korkeus	9
2.2	Geoidi ja geoidimallit	10
2.3	Fennoskandian maannousu	13
2.4	Suomen korkeusjärjestelmät	14
2.4.1	NN-korkeusjärjestelmä	15
2.4.2	N60-korkeusjärjestelmä	15
2.4.3	N2000-korkeusjärjestelmä	17
2.4.4	Paikalliset korkeusjärjestelmät	20
3	VAAITUS MITTAUSTAPANA	21
3.1	Vaaituksen periaate	21
3.2	Vaaitustekniikan historiaa	22
3.3	Vaaituskojeet	24
3.3.1	Itsetasaavat vaaituskojeet	25
3.3.2	Digitaaliset vaaituskojeet	27
3.3.3	Tasolaserit	29
3.3.4	Vaaituskojeen kalibrointi	29
3.4	Jonovaaitus	30
3.5	Tarkkavaaitus	31
4	N2000-TARKKAVAAITUSHANKE	32
4.1	Korkeusrunkomittaukset	32
4.2	Hankkeen kulku	32
4.3	Vaaitusverkon suunnittelun ja toteutuksen periaatteet	36
4.3.1	Vaaitusverkon tarkkuus	36
4.3.2	Vaaitusverkon luotettavuus	38
4.4	Tasoitusbaskenta	40
4.4.1	Havainnoissa esiintyvät virheet	41
4.4.2	PNS-tasointu	42
4.4.3	Tuusulan N2000-verkon tasointu	48
4.5	Vaaitusverkon tasointusbaskennan johtopäätökset	51
5	POHDINTA	53

LÄHTEET.....	55
--------------	----

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

BLR2000	(Baltic Levelling Ring) on Itämeren ympärysalueen tasoitettu vaaitusverkko (JUHTA 2008, 8).
EVRS	(European Vertical Reference System) on eurooppalainen korkeusjärjestelmä (JUHTA 2008, 13).
ETRS89	(European Terrestrial Reference System) on eurooppalainen koordinaattijärjestelmä, joka on yhteneväinen kansainvälisen ITRS-järjestelmän (International Terrestrial Reference System) kanssa epookissa 1989.0 (JUHTA 2008, 13).
EUREF-FIN	on ETRS89-järjestelmän suomalainen realisaatio (JUHTA 2008, 13).
FIN2005	on N2000-korkeusjärjestelmään sovitettu geoidimalli, joka perustuu pohjoismaiseen NKG2004-geoidimalliin (JUHTA 2008, 13).
GNSS	(Global Navigation Satellite System) on maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä (Laurila 2012, XIX).
GPS	(Global Positioning System) on yhdysvaltalainen satelliittipaikannusjärjestelmä (JUHTA 2008, 13).
GRS80	(Geodetic Reference System 1980) on globaali vertausjärjestelmä, jonka IAG (International Association of Geodesy) käyttöönotti vuonna 1979 (Laurila 2012, XIX).

INSPIRE	(Infrastructure for Spatial Information in Europe) on Euroopan Unionin paikkatietoja koskeva direktiivi (JUHTA 2008, 14).
N2000	on Suomen nykyinen, valtakunnallinen korkeusjärjestelmä.
NKG2004	(Nordiska Kommissionen för Geodesi) on vuonna 2004 julkaistu pohjoismainen geoidimalli (JUHTA 2008, 14).
NKG2005LU	on pohjoismainen maannousumalli (JUHTA 2008, 7).
NAP	(Normaal Amsterdams Peil) on eurooppalaisten korkeusjärjestelmien lähtötaso, joka on Amsterdamissa vuonna 1684 vallinneen keskimääräisen tulvavuoksen huippu (JUHTA 2008, 14).
PNS	on pienimmän neliösumman menetelmä.
PP2000	on kiintopiste, joka on N2000-korkeusjärjestelmän lähtötaso (JUHTA 2008, 7–9).
ppm	(Parts per million) on suhteellisen tarkkuuden yksikkö, joka kertoo kuinka monta miljoonasosaa matkasta arvioitu virhe on (Laurila 2015, 225).
XPLocal	on X-Positionin maastohavaintojen käsittelyyn tarkoitettu verkkotasoitushjelma (X-Position 1998).

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö jakautuu kahteen osioon. Ensimmäisessä osioon sisältyy yleiskuvaus vaaituksesta mittaustapana. Siinä esitellään yleisimmät vaaituskojeet ja -menetelmät. Osioon sisältyy myös katsaus vaaitustekniikan historiaan. Lisäksi käsitellään korkeusjärjestelmiä ja niiden perusteita, keskittyen Suomessa käytettäviin korkeusjärjestelmiin.

Opinnäytetyön toisessa osiossa kerrotaan kesällä 2015 Tuusulan kunnassa suoritetusta tarkkavaaitushankkeesta, jonka tavoitteena oli kunnassa aikaisemmin käytetyn N43-korkeusjärjestelmän päivittäminen ja sen liittäminen uusimpaan valtakunnalliseen N2000-korkeusjärjestelmään. Tarkkavaaitustyöstä vastasi Destia Oy ja vaaitusverkon tasoituslaskennasta Geopixel Oy. Hankkeesta kertoessa pyrin antamaan yleiskuvan tarkkavaaitustyöstä sekä kertomaan omia havaintoja ja kokemuksia siihen liittyen. Erityisesti keskitytään kuitenkin vaaitusverkon suunnitteluun ja tasoituslaskentaan sekä vaaitustulosten tulkitsemiseen.

Kiinnostuin tästä opinnäytetyöaiheesta työskennellessäni insinöörioppilaana Destia Oy:llä kesällä 2015. Oman työpanokseni tälle hankkeelle annoin osallistumalla tarkkavaaitustyöhön, jonka parissa työskentelin lähes yhtäjaksoisesti noin neljän kuukauden ajan. Tuusula on Uudellamaalla sijaitseva 38 198 asukkaan kunta ja se on perustettu vuonna 1643 (Tuusulan kunta 2013a). Kokonaispinta-alaltaan 225,45 neliökilometrin suuruinen kunta koostuu kolmesta maaseudun ympäröimästä asutuskeskittymästä: Hyrylästä, Jokelasta ja Kellokoskesta (Tuusulan kunta 2013b).

2 KORKEUSJÄRJESTELMÄT

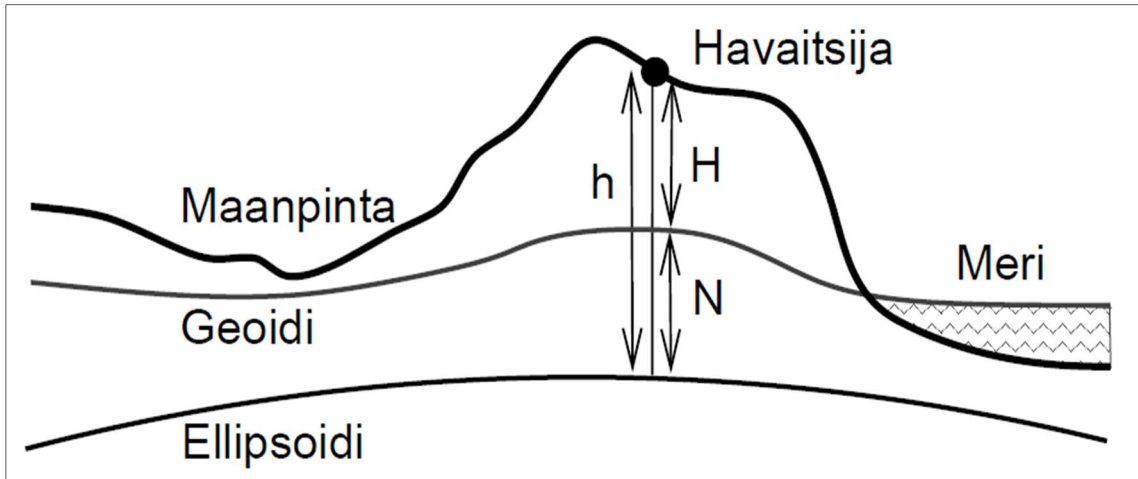
Korkeus on kulmien ja etäisyyksien ohella yksi kolmesta maanmittauksessa käytettävistä perussuureista (Price & Uren 2010, 28). Useimmiten korkeudella tarkoitetaan kohteen pystysuoraa etäisyyttä merenpinnasta mitattuna. Korkeusjärjestelmän määrittelyyn vaikuttavien tekijöiden joukkoa kutsutaan vertikaaliseksi datumiksi eli korkeusdatumiksi. Näistä tärkeimmät ovat referenssitaso eli korkeusjärjestelmän vertailutaso ja epookki eli ajankohta, johon referenssitaso sisältyy. Modernit korkeusjärjestelmät liittyvät painovoimaan, jolloin korkeuden vertauspintana toimii paikallisen keskimerenpinnan tai nollatason määrittelevän lähtöpisteen kautta kulkeva geoidi. (Laurila 2012, 165–168.)

2.1 Ortometrinen ja ellipsoidinen korkeus

Kun puhutaan merenpinnasta mitatusta korkeudesta, sanatarkasti silloin tarkoitetaan geoidin pinnasta mitattua korkeutta (Kuvio 1). Tätä kutsutaan myös ortometriseksi korkeudeksi. Suomessa esimerkiksi N60-järjestelmän korkeudet ovat ortometrisiä korkeuksia ja sen vertauspintana on vuoden 1960 keskivedenkorkeus. Mittauksissa ja teknisissä suunnitteluissa käytetään useimmiten ortometrisiä korkeuksia, koska ne ovat sidoksissa painovoimaan ja näin ollen kertovat muun muassa veden virtaussuunnan maanpinnalla. Vaaituskojeella ja takymetrillä mitatut korkeudet ovat geoidin pinnasta mitattuja. (Laurila 2012, 165.)

Ellipsoidisesta korkeudesta puhutaan, kun korkeus mitataan Maan matemaattisen mallin eli pyörähdysellipsoidin pinnasta (Laurila 2012, 165). Esimerkiksi yleiseurooppalaisen ETRS89-järjestelmän ja sen suomalaisen realisaation EUREF-FIN:n korkeudet ovat ellipsoidisia korkeuksia mitattuna GRS80-vertausellipsoidin pinnalta. Vertausellipsoidista mitatulla korkeudella ei normaaleissa mittauksissa ole juurikaan käyttöä, koska se ei ole sidoksissa painovoimaan ja ei siis kerro veden virtaussuuntaa. Yksikään korkeusjärjestelmä ei perustu ellipsoidisiin kor-

keuksiin, joten ne muutettava geoidimallin avulla ortometrisiksi korkeuksiksi. Esimerkiksi satelliittipaikannuksella saadut korkeudet ovat ellipsoidisia korkeuksia. (Häkli, Koivula, Poutanen & Puupponen 2009, 33.)



Kuvio 1. Erilaisia korkeuksia: ellipsoidinen korkeus h , vaaittu eli ortometrinen korkeus H ja geoidikorkeus N (Häkli ym. 2009, 34)

2.2 Geoidi ja geoidimallit

Geoidi on Maan muotoa kuvaava malli, johon keskimerenpinta asettuu lepotilassa. Se yhdistää valtameret ja jatkuu mantereiden ali. Käytännössä keskimerenpinnan ja geoidin välillä on kuitenkin poikkeamia. Poikkeamia aiheuttavia syitä ovat muun muassa veden lämpötila-, suolaisuus- ja ilmanpainevaihtelut sekä valitsevat tuulet ja merivirrat. Geoidi on Maan massojen ja tiheysvaihteluiden määräämä pinta, joten sen muotoa ja tarkkaa sijaintia kolmiulotteisessa avaruudessa on vaikeaa määrittää matemaattisesti. Geoidin pinnan muoto on aaltoileva, koska maapallon massa on epätasaisesti jakautunut. (Paikkatietokeskus 2016a.)

Geoidimallissa havainnollistetaan geoidin korkeus ellipsoidista eli geoidikorkeus (Kuvio 1). Sitä käytetään yleisesti satelliittimittauksella saatujen korkeuksien muuntamiseen ortometrisiksi eli vaaituiksi korkeuksiksi (Kaava 1). Erityistä tarkkuutta vaativissa tapauksissa korkeuden muunnos tehdään valtakunnallisen geoidimallin sijasta paikallisella geoidimallilla, joka saadaan tarkkavaaitsemalla

alueelle tarkasti mitattu GNSS-pisteistö. (Laurila 2012, 174–175.) Korkeuden muunnos johdetaan

$$N = h - H, \quad (1)$$

missä

N	on	geoidimallista laskettu geoidikorkeus
h	on	ellipsoidinen korkeus
H	on	ortometrinen korkeus (Laurila 2012, 174).

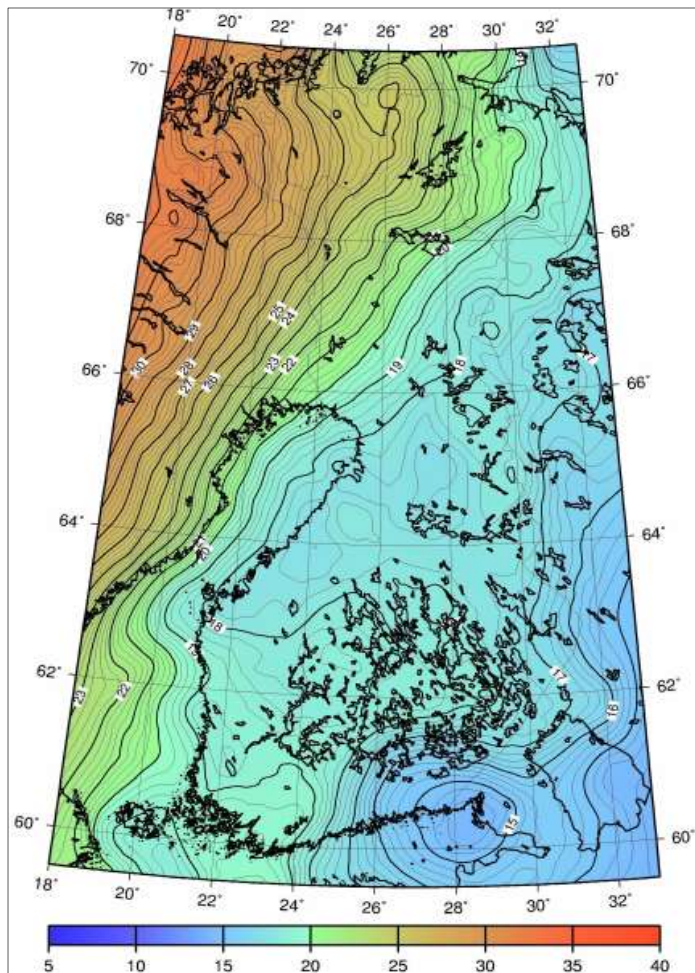
Geoidimallin määrittämiseen käytetään pitkällä aikavälillä tehtyjä havaintoja ja tutkimuksia Maasta, esimerkiksi painovoimahavaintoja. Painovoimakentän kartoitusta tehdään Maata kiertävien satelliittien avulla, minkä lisäksi niistä saatavaa aineistoa tarkennetaan Maan pinnalla tehtävillä painovoimahavainnoilla. Painovoima-aineiston perusteella määritetään Maan potentiaalmalli, josta edelleen voidaan laskea geoidimalli. (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 5.)

Geoidimalleja on saatavilla globaaleina, alueellisina ja kansallisina. Kansallinen geoidimalli muodostuu, kun alueellinen geoidimalli sovitetaan kansalliseen korkeusjärjestelmään. Sitä voidaan käyttää muunnettaessa satelliittipaikannuksella saatuja ellipsoidikorkeuksia ortometrisiksi korkeuksiksi ja toisinpäin. (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 1.) Kansalliset geoidimallit perustuvat aina jossain määrin globaaleihin geoidimalleihin, sillä alueellisen geoidimallin perustana ovat havainnot koko Maan painovoimakentästä (Laurila 2012, 174). Suomen kansallisia geoidimalleja ylläpitää ja tutkii Paikkatietokeskus, joka toimi vuoteen 2015 asti nimellä Geodeettinen laitos (Paikkatietokeskus 2016b).

Vuonna 2004 julkaistiin uusi Pohjoismainen geoidimalli NKG2004, jolloin Suomessa oli myös samanaikaisesti käynnissä N2000-korkeusjärjestelmän luominen. Tästä syystä kehitettiin Suomeen vuonna 2005 uusi kansallinen geoidimalli FIN2005 (Kuvio 2). (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 13.) Se saatiin sovitettamalla tarkkavaaittu GPS-pisteistö pohjoismaiseen geoidimalliin pienimmän ne-

liösumman menetelmää käyttäen ja sitä suositellaan käytettäväksi N2000-korkeusjärjestelmän kanssa (Hakala 2016a, 14.) FIN2005-geoidimallin avulla voidaan muuntaa satelliittipaikannuksella saadut GRS80-ellipsoidin korkeudet N2000-järjestelmän mukaisiksi normaalikorkeuksiksi (Häkli ym. 2009, 33).

Toinen Suomessa käytetty geoidimalli on FIN2000, joka muuntaa ellipsoidiset korkeudet N60-järjestelmän ortometrisiksi korkeuksiksi (Laurila 2012, 174). Edellä mainittujen mallien lisäksi voidaan käyttää paikallista geoidimallia, joka toimii korjauspintana valtakunnalliselle geoidimallille. Sen tarkkuus on paikallisissa mittauksissa monesti valtakunnallisia geoidimalleja parempi. Parhaimmillaan paikallinen geoidimalli voi olla 5–10 millimetriä tarkempi kuin valtakunnalliset mallit. Korjauspinnan tarkkuus ja maksimivirheet riippuvat satelliittimittauksen sekä paikallisen korkeuspisterunkoverkon laadusta. (Hakala 2016a, 16.)

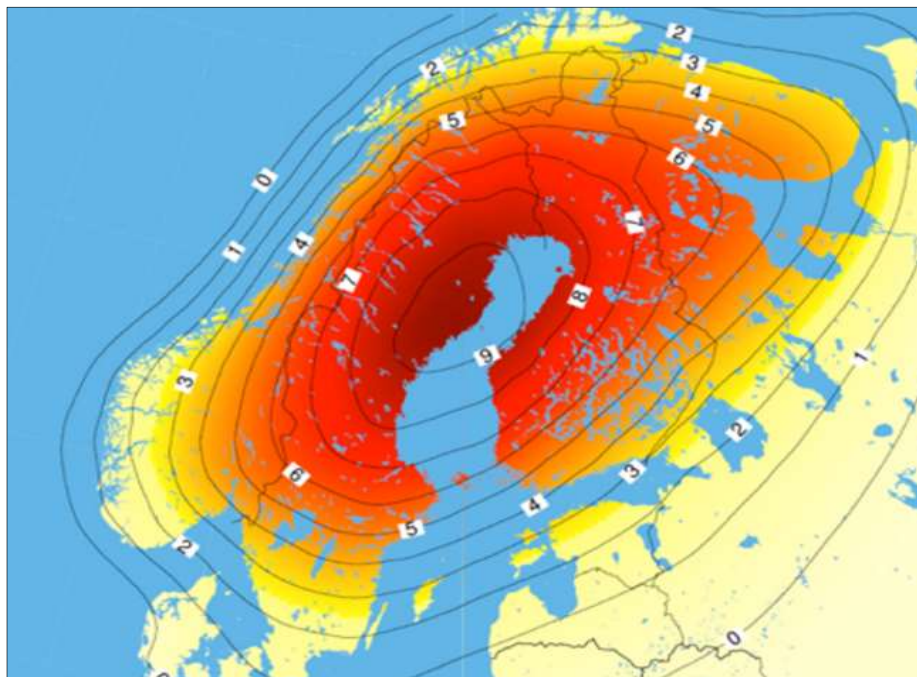


Kuvio 2. FIN2005-geoidimallin mukaiset geoidinkorkeudet metreissä, GRS80-ellipsoidista (JUHTA 2008, 12)

2.3 Fennoskandian maannousu

Maannousu on seurausta jääkaudelta, jolloin maata peitti parin kilometrin paksuinen mannerjää. Massiivisen jäämassan painosta maanpinta painui satoja metrejä lommolle. Fennoskandian alueella edellinen jääkausi päättyi noin 10 000 vuotta sitten. Jääkauden päätyttyä ja jäätikön sulettua maankuori on alkanut hitaasti oikenemaan alkuperäiseen muotoonsa. Tämä ilmenee uuden maan nousemisena merestä. (Kakkuri 1991, 41–43.)

Maankohoaminen on suurinta Pohjanlahden rannikolla, koska tällä alueella mannerjää oli paksuimmillaan. Fennoskandian maannousuilmio jatkuu vielä noin 10 000 vuoden ajan ja maa tässä ajassa kohoaa jopa sata metriä. (Kakkuri 1991, 41–43.) Suomessa maannousuilmio on selvimmin nähtävissä Itämerellä, erityisesti Merenkurkun alueella. Siellä maa kohoaa vuodessa noin yhdeksän millimetriä. Pienintä maannousu on Kaakkois-Suomessa, jossa se on alle kolme millimetriä vuodessa (Kuvio 3). (Paikkatietokeskus 2016c.)



Kuvio 3. Fennoskandian maannousu Maan keskipisteen suhteen (mm/a) (Paikkatietokeskus 2016c)

Nykyisin Suomessa ja muuallakin Pohjoismaissa maannousu on ilmiönä varsin hyvin tunnettu. Maankohoamista ja sen nopeutta voidaan mitata rannikkoalueilla mareografeilla ja muilla vedenkorkeusmittareilla, joilla seurataan merenpinnan korkeuden muutosta rantaviivaan nähden. Sisämaassa maankohoamista voidaan seurata tarkkavaaitusten avulla. Pohjoismaissa tehtyjen tarkkavaaitusten perusteella koko Fennoskandian alueen maannousu pystytään määrittämään varsin tarkasti. Maannousun paikallisia eroja pystytään kuvaamaan maannousukartoilla, jotka kertovat maankohoamisen keskimerenpintaan nähden. (Paikkatietokeskus 2016c.)

Napajäätiköiden sulamisen aiheuttama globaali merenpinnan nousu lieventää maannousuilmiötä rannikkoalueilla. Toistaiseksi maannousu on ollut suurempaa merenpinnan nousuun verrattuna, mutta viime vuosina merenpinnan nousunopeuden kehitys on ollut kasvamaan päin. Suomessa maannousua ja merenpinnan muutoksen vaikutuksia tutkii Paikkatietokeskus. (Paikkatietokeskus 2016c.)

Geodeettisiin mittauksiin maannousuilmiö vaikuttaa monella tavalla. Maannousu ei ole kaikkialla yhtä suurta vaan siinä esiintyy merkittäviä paikallisia eroja. Tämä vaikuttaa erityisesti korkeusrunkopisteisiin, koska niiden väliset korkeuserot muuttuvat maankohoamisen myötä. Tästä syystä korkeusjärjestelmää joudutaan uudistamaan Suomessa muutaman vuosikymmenen välein. (Laurila 2012, 168.)

2.4 Suomen korkeusjärjestelmät

Maa kohoaa Suomessa paikoitellen lähes senttimetrin vuodessa, joten valtakunnallinen korkeusjärjestelmä joudutaan tasaisin väliajoin uusimaan (Häkli ym. 2009, 31). Korkeusjärjestelmän uusiminen tapahtuu suorittamalla koko maan kattavia tarkkavaaituksia, jossa mitataan korkeusrunkopisteiden korkeudet. Uutta korkeusjärjestelmää määritellessä on otettava huomioon vertailutaso eli vaaituksen lähtökorkeus ja ajankohta, jolloin vertailutaso mitataan. (Laurila 2012, 168.)

Suomessa on noin 120 vuoden aikana suoritettu kolme valtakunnallista tarkkavaaitusta, joiden vaaitustuloksista on muodostettu NN-, N60- ja N2000-korkeusjärjestelmät. (Häkli ym. 2009, 31.) Valtakunnallisten korkeusjärjestelmien lisäksi kunnilla ja kaupungeilla voi omia, paikallisia korkeusjärjestelmiään (Laurila 2012, 169).

2.4.1 NN-korkeusjärjestelmä

Ensimmäisen vuosina 1892–1910 tehdyn tarkkavaaituksen (Kuvio 4, s. 17 vasemmalla) suoritti Tie- ja vesirakennusten ylihallitus ja sen tuloksista muodostettiin NN-korkeusjärjestelmä. Vaaitusverkko kattoi pääasiassa eteläisen Suomen alueen Oulu-Kajaani-linjalle asti. Vaaittujen linjojen yhteispituus oli yli 5 000 kilometriä ja suurin osa mittauksista suoritettiin rautateitä pitkin. (Häkli ym. 2009, 31.) Vaaitustuloksissa ei otettu huomioon maannousun vaikutusta, mutta siihen liitettiin normaalipainovoiman mukainen ortometrinen korjaus (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 3).

Lähtökorkeuden määrittä Helsingin Katajanokan siltaan kiinnitetty vesikorkeusasteikon nollapiste. Vaaituksen pääkiintopiste sijaitsi Helsingissä Tähtitorninmäellä, johon verrattuna nollapiste sijaitsi 30,4652 metriä alempana. Vuosina 1904–1909 tehdyistä uusista havainnoista pystyttiin toteamaan, että Katajannokalta mitattu nollakorkeus oli todellisuudessa 109 millimetriä Helsingin keskivedenkorkeuden alapuolella. NN-korkeusjärjestelmä on edelleen joissain yhteyksissä vielä käytössä, kuten muun muassa vesistöjen säännöstelypäätöksissä ja sisävesien syvyystiedoissa. (Häkli ym. 2009, 31–32.)

2.4.2 N60-korkeusjärjestelmä

Vuonna 1935 Geodeettinen laitos aloitti Suomen toisen valtakunnallisen tarkkavaaituksen reagoidakseen maan kohoamiseen ja Pohjois-Suomen taloudellisen elämän kiihtymiseen. Uusi korkeusjärjestelmä haluttiin mahdollisimman nopeasti

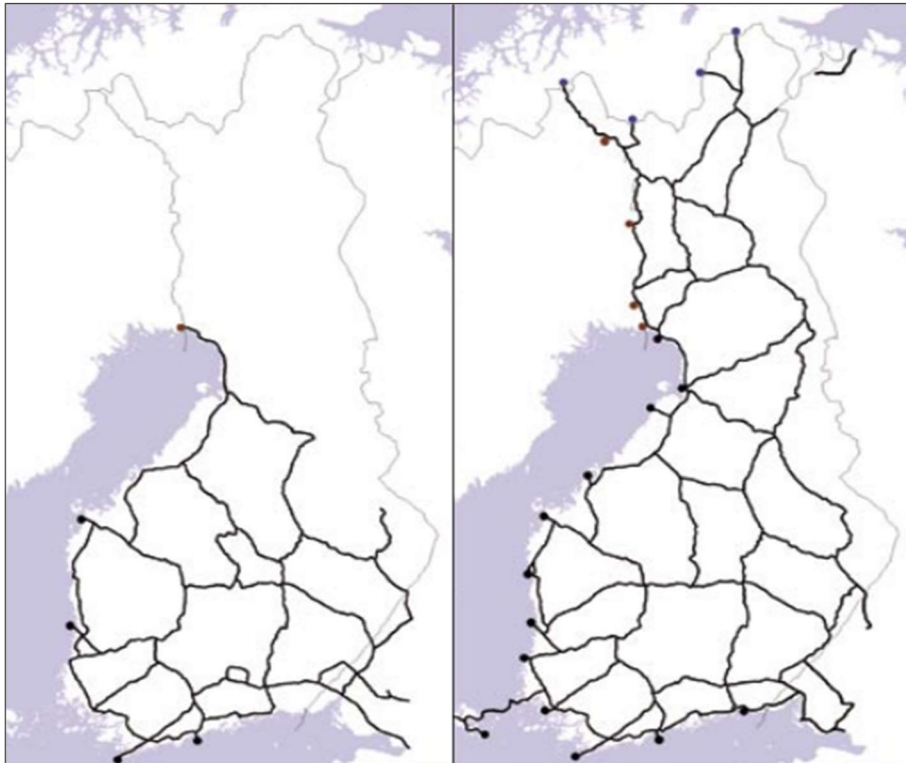
käyttöön, tästä syystä luotiin väliaikainen N43-korkeusjärjestelmä. Aluksi vaaituksen lähtökorkeus otettiin Helsingin Pasilassa olevasta pisteestä, jolle annettiin NN-korkeusjärjestelmän mukainen korkeus. Myöhemmin nollatasoksi vaihdettiin Helsingin vuoden 1943 keskivedenkorkeus. Vaaituksen lähtötaso oli siis sama kuin aiemmassakin valtakunnallisessa tarkkavaaituksessa. Tämä aiheutti poikkeamia näiden kahden vaaituksen korkeuslukujen välillä paikoissa, joissa maankohoamisen nopeus oli erilaista verrattuna Helsingin maankohoamisen nopeuteen. (Häkli ym. 2009, 32.)

Vaaituksen kenttätyöt saatiin valmiiksi vuonna 1955 pääverkon osalta. Pääverkko ulottui Aavasaksa-Rovaniemi-Kemijärvi-linjalle asti. Vaaituslinjojen kokonaispituus oli yli 6 200 kilometriä ja ne vaaittiin suurimmaksi osaksi rautateitä pitkin. N43-korkeusjärjestelmän korkeuksien tasoituksessa ei käytetty koko vaaitusverkkoa, vaan järjestelmää laajennettiin ja tasoitettiin osissa. Edellisen silmukan tuloksina saadut korkeudet olivat aina tasoituksessa kiinnitettynä ja uudet pisteet mukautettiin jo laskettuihin korkeuksiin. (Häkli ym. 2009, 32.)

Kun toisen valtakunnallisen tarkkavaaituksen pääverkko oli saatu mitattua vuonna 1955, sille suoritettiin koko vaaitusverkon kattava tasoitus painovoimaan liittyviä geopotentialilukuja käyttäen (Laurila 2012, 168). Tasoituksen tuloksista saatiin vuonna 1960 kahden valtakunnallisen tarkkavaaituksen väliset korkeuserot ja maankohoamisen suuruus noin 1 000 kiintopisteelle. Näiden havaintojen pohjalta luotiin N60-korkeusjärjestelmä, jonka lähtökorkeudeksi annettiin Helsingin teoreettinen keskivedenkorkeus vuonna 1960. Teoreettinen vedenkorkeus määritettiin vuosien 1935–1954 havaintojen perusteella. (Häkli ym. 2009, 32.)

Koska ensimmäinen tarkkavaaitus ei kattanut Pohjois-Suomea, suoritettiin Lapissa vuosina 1953–1972 tarkkavaaituksia. Mittausten perusteella luotiin LN-korkeusjärjestelmä. Vuosien 1973–1975 uusintavaaitusten perusteella saatiin määritettyä maankohoaminen Lapin alueella ja LN-korkeudet voitiin korvata N60-korkeuksilla. Näin ollen kokonaisuudessaan 40 vuotta kestänyt toinen tarkkavaaitus (Kuvio 4, s. 17 oikealla) saatiin päätökseen. (Häkli ym. 2009, 32.)

N60-järjestelmästä tuli koko maan kattava korkeusjärjestelmä ja se on myös ensimmäinen tarkan maannousun ja painovoiman vaikutuksen huomioon ottava korkeusjärjestelmä (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 3). Järjestelmän mukaiset korkeudet ovat ortometrisiä korkeuksia (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 3) ja niitä käytetään edelleen joissain Suomen kunnissa (Laurila 2012, 169).

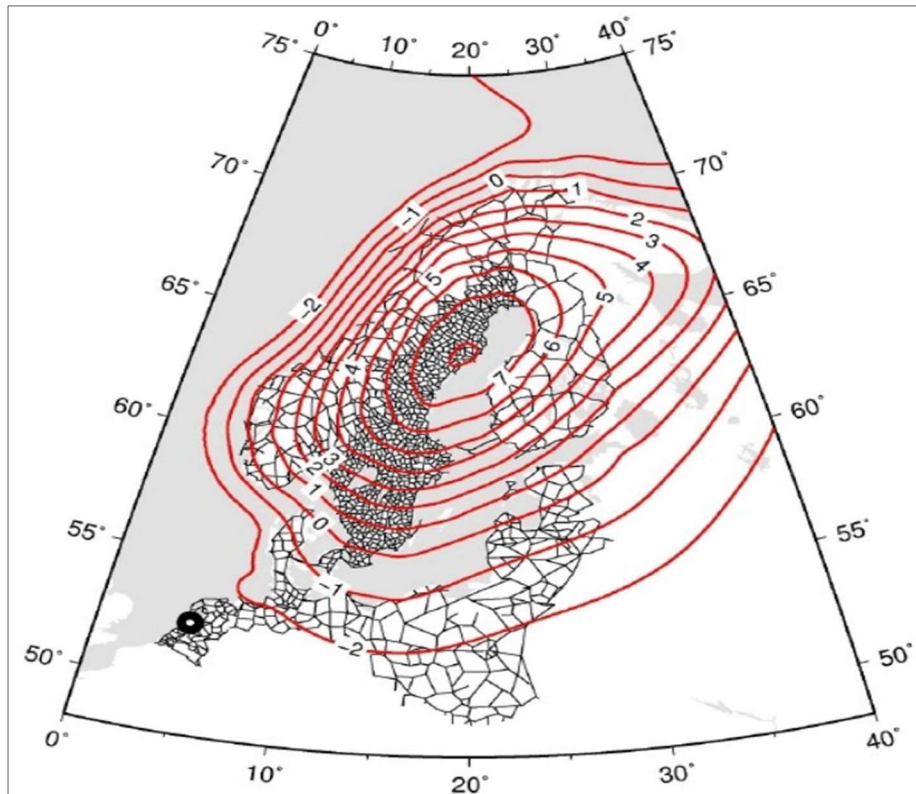


Kuvio 4. Vasemmalla 1. tarkkavaaituksen (1892–1910) linjasto ja oikealla 2. tarkkavaaituksen (1935–1975) linjasto (Maanmittauslaitos 2016a)

2.4.3 N2000-korkeusjärjestelmä

N2000-korkeusjärjestelmän perustana on Suomessa vuosina 1978–2006 suoritettu tarkkavaaitus ja se on yhteiseurooppalaisen EVRS-korkeusjärjestelmän suomalainen realisaatio. Korkeusjärjestelmän lähtötaso saatiin pohjoismaisena yhteistyönä Itämeren ympäri tehdyn vaaitusverkon tasoituksesta. Tasoituksesta käytetään nimitystä BLR2000 (Kuvio 5) ja siihen sisällytettiin korkeuserohavain-

toja Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Tanskasta, Pohjois-Saksasta, Puolasta, Hollannista, Virosta, Liettuasta ja Latviasta. Sen lähtötaso on Hollannin Amsterdamissa sijaitseva kiintopiste, jota kutsutaan NAP:ksi. (Häkli ym. 2009, 32–33.)



Kuvio 5. Itämeren ympäröivän alueen tasoitettu vaaitusverkko BLR2000, jossa NAP on merkitty ympyrällä (JUHTA 2008, 8)

Tasoituksessa käytetyt korkeuserohavainnot, joiden mittaamisen jälkeen oli tapahtunut maankohoamista, muutettiin vastaamaan epookin 2000.0 mukaisia korkeuseroja. Tähän käytettiin pohjoismaista maannousumallia NKG2005LU. Pohjoismaisen geodeettinen komissio on antanut suosituksen vuoden 2000 käyttämisestä pohjoismaisten korkeusjärjestelmien nollahetkenä. NKG2005LU on käytökelpoisiin koko Fennoskandian alueen kattava maannousumalli ja se ilmaisee maannousun suhteessa keskimääräiseen merenpinnan nousuun. (JUHTA 2008, 7.)

Maannousumallin antamat maankohoamisen arvot eivät juurikaan poikkea Suomen kolmen tarkkavaaituksen tuloksista lasketuista maannousuarvoista. Pohjoismaiden osalta se sisältää eri tavoin mitattuja korkeuserohavaintoja, muuan

muassa pysyvien GPS-asemien mittausaineistoja ja mareografien havaintoja sekä toistettujen tarkkavaaitusten havaintoja. (JUHTA 2008, 7.)

Suomen kolmannen tarkkavaaituksen kenttätyöt aloitettiin vuonna 1978 ja ne saatiin päätökseen syksyllä 2006. Vaaituslinjojen yhteispituus oli 9 158 kilometriä ja kiintopisteitä oli yhteensä 6 092. Tarkkavaaituksesta vastasi Geodeettinen laitos ja tasoitettu kilometrikeskivirhe oli $\pm 0,86 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$. Vaaituslinjastoon (Kuvio 6) sisältyvät liitokset sekä mareografeille että Ruotsin, Norjan ja Venäjän vaaitusverkkoon. (JUHTA 2008, 7–9.)



Kuvio 6. Kolmannen valtakunnallisen tarkkavaaituksen linjasto (Maanmittauslaitos 2016a)

N2000-korkeudet saatiin tasoittamalla geopotentialiarvoina annetut vaaitushavainnot suhteessa tarkkavaaituksen pääkiintopisteen geopotentialiarvoon. Tämä pääkiintopiste PP2000 sijaitsee Geodeettisen laitoksen Metsähovin observatoriossa Kirkkonummella. Kolmannen tarkkavaaituksen korkeushavaintoihin

on tehty nollavuoksikorjaus, joka ottaa huomioon Auringon ja Kuun vetovoimien vaikutuksen geopotentiaalilukuun säilyttäen kuitenkin niiden aiheuttaman Maan pysyvän muutoksen. (JUHTA 2008, 7–9.)

N2000-järjestelmän korkeudet ovat normaalikorkeuksia, toisin kuin N60-järjestelmän korkeudet. Näiden kahden järjestelmän välillä on 13–43 senttimetrin korkeusero ja pääosa tästä erosta johtuu Suomessa noin 40 vuoden aikana tapahtuneesta maannoususta. Muita vähäisempiä syitä ovat lähtötason muuttuminen, vuoksikorjaus ja normaalikorkeuteen siirtyminen. N2000-järjestelmä poikkeaa Suomen aiemmista korkeusjärjestelmistä myös siten, että se ei ole sidottu Helsingin keskimääräiseen merenpintaan vaan se perustuu NAP:n korkeustasoon. (JUHTA 2008, 7–9.)

N2000-järjestelmä on Suomen nykyinen valtakunnallinen korkeusjärjestelmä ja sitä luotaessa on otettu huomioon eurooppalaisen EVRS-korkeusjärjestelmän mukaiset määritelmät ja EU:n INSPIRE-direktiivin vaatimukset (JUHTA 2008, 2). Sitä suositellaan käytettävän valtakunnallisissa kartoitustöissä sekä paikkatietopalveluissa. Korkeusjärjestelmä on käytössä monella valtion viranomaisella, esimerkiksi Maanmittauslaitoksella, Paikkatietokeskuksella ja Merenkululaitoksella (Maanmittauslaitos 2016a).

2.4.4 Paikalliset korkeusjärjestelmät

Useilla kunnilla ja kaupungeilla on lisäksi omia korkeusjärjestelmiään, joita ei ole välttämättä liitetty mihinkään viralliseen korkeusjärjestelmään. Kunnan korkeusjärjestelmä voi perustua esimerkiksi johonkin aikaisempaan korkeusjärjestelmään tai olla valtakunnallisista järjestelmistä täysin riippumaton. Tämä aiheuttaa ongelmia, mikäli mittaajat eivät ole tietoisia järjestelmäeroista tai eivät ota niitä huomioon. (Bilker-Koivula & Ollikainen 2009, 4.)

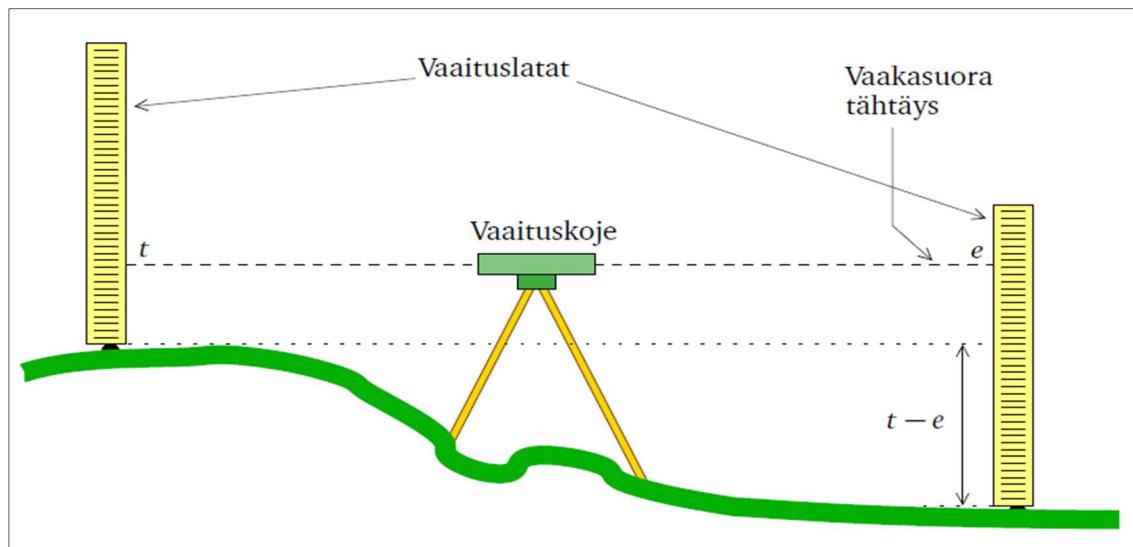
3 VAAITUS MITTAUSTAPANA

3.1 Vaaituksen periaate

Korkeus ilmaisee kohteen sijainnin pystysuunnassa Maan paikallisen painovoimavektorin suuntaan (Vermeer 2015, 63). Yksi korkeuden määrittämiseen tarkoitettu mittaustapa on vaaitseminen, johon käytettävää mittaussinstrumenttia kutsutaan vaaituskojeeksi. Vaaitsemalla tehdyllä mittauksella on mahdollista määrittää ainoastaan korkeuksia. Lisäksi korkeuksia on nykyisin mahdollista mitata myös takymetrillä tai satelliittipaikannuksella, joilla voidaan lisäksi mitata myös tasosijainteja. (Price & Uren 2010, 28.)

Vaikka vaaitus on edelleen melko samanlaista kuin satoja vuosia sitten, niin sillä päästään kuitenkin tarkimpiin korkeustuloksiin. Vaaitsemalla on mahdollista mitata korkeuksia vaaituskojeesta riippuen, hyvinkin tarkasti. Tämän vuoksi se on paras korkeudenmääritysmenetelmä tarkkoja korkeuksia vaativissa mittauksissa. Tarkkuutensa ja helppokäyttöisyytensä johdosta se sopii hyvin runkopistemitauksiin sekä monenlaisiin rakentamisen mittauksiin. (Laurila 2012, 203.)

Vaaitus perustuu kahden pisteen väliseen korkeuseroon, joka mitataan muodostamalla vaakasuora tähtäyslinja paikallisessa painovoimakentässä. Vaaituskoje on yksinkertaistettuna hiusristikolla varustettu kaukoputki, joka tasataan kolmijalan päälle. (Maanmittauslaitos 2016b.) Kojeella mitataan eteen- ja taakselukemat pystysuorassa olevaan asteikkoon, jota kutsutaan latakseksi (Kuvio 7). Pisteiden välinen korkeusero saadaan vähentämällä taakselukema eteenpäin havaitusta. Kun edellä mainittu korkeusero mitataan korkeudeltaan tunnetun korkeuskiintopisteen suhteen, voidaan esimerkiksi määrittää korkeus uudelle pisteelle. (Laurila 2012, 205–206.)

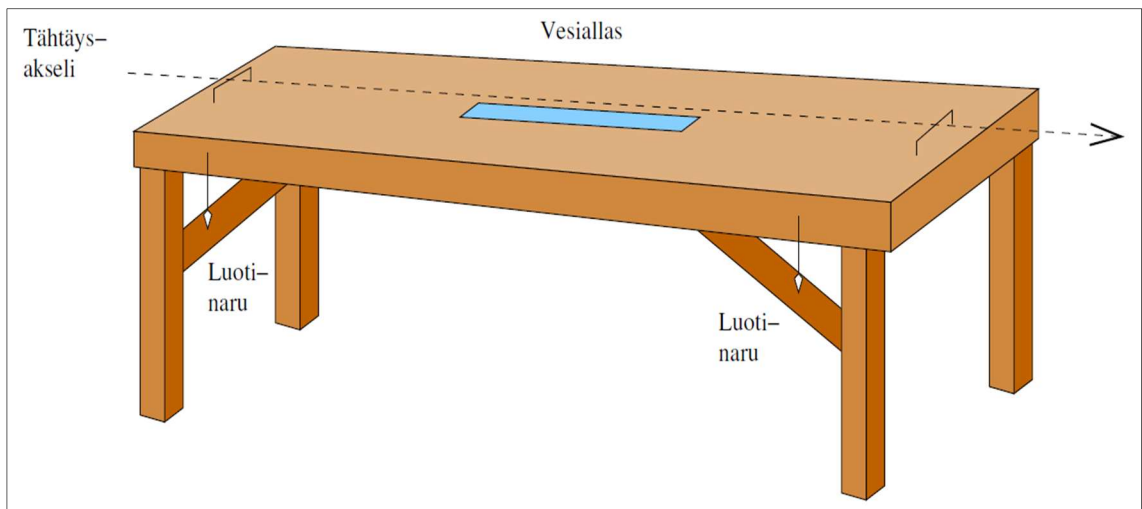


Kuvio 7. Vaaituksen periaate (Vermeer 2015, 67)

3.2 Vaaitustekniikan historiaa

Vaaituksen historia ulottuu pitkälle historiaan, aina muinaisen Egyptin aikaisiin valtaviin rakennusprojekteihin asti. Varhaisimmat vaaitusmenetelmät käyttivät säiliössä olevaa vettä esimerkiksi maanpinnan kanssa samalla tasolla olevien kohteiden havaitsemiseen. (NOAA 2007.) Näin pystyttiin rakentamaan tasainen perustus vaikkapa pyramidille (BBC 2014).

Myöhemmin antiikin Kreikassa päästiin entistä tarkempiin mittauksiin, kun geometria keksittiin. Itse asiassa ”geometria” tarkoittaa sanatarkasti maan mittaamista (*geo*=maa, *metron*=mittaus). (Päivänen 2010, 85.) Kreikkalaisilla ja myöhemmin roomalaisilla oli myös omia alkeellisia vaaitusmenetelmiään. Näistä mainittakoon esimerkkinä chorobates (Kuvio 8), joka oli puinen vaaituspöytä. Rakennelmassa oli pöytätasoon upotettu vesiallas ja sen korkeusmittausperiaate oli varsin samanlainen kuin modernissakin vaaituskojeessa. (Vermeer 2006.) Pöydän molemmissa päissä roikkuvilla luotinaruilla voitiin varmistua siitä, että se oli vaakatasossa (Ferris State University 2016). Chrobatesia käytettiin muun muassa teiden ja akveduktien eli vesijohtojen rakentamiseen (Vermeer 2006).



Kuvio 8. Havainnekuva puisesta vaaituspöydästä, chorobatesista (Vermeer 2006)

Merkittävä keksintö vaaituksen tarpeisiin oli vesivaaka eli vatupassi, jonka keksi ranskalainen Melchisedech Thevenot 1600-luvun puolivälin tienoilla. Thevenot keksi säilöä pieneen läpinäkyvään putkiloon vettä siten, että siihen jää ilmakupla. Putkilo on vaakasuorassa, kun ilmakupla asettuu sen keskelle. Noin sata vuotta myöhemmin se toimi perusideana ensimmäisille optisille vaaituskojeille (Kuvio 9). Ne olivat heikkotehoisia, hiusristikolla varustettuja kaukoputkia, joiden tasaaminen tapahtui vatupassin lailla toimivan tasainputken avulla. (NOAA 2007.) Nykyaikaiset optiset vaaituskojeet ovat perusperiaatteeltaan melko samankaltaisia (Laurila 2012, 203).



Kuvio 9. Vaaituskoje 1860-luvulta (Trustees of Dartmouth College 2016)

3.3 Vaaituskojeet

Vaaituskoje on rakenteeltaan helppokäyttöinen optinen laite, jolla mittaaminen tapahtuu tähtäämällä vaakasuoraan asetetulla mittauskaukoputkella (Laurila 2012, 207). Mittauskaukoputken tehtävänä on antaa tarkka kuva tähtäyskohdesta ja sen okulaarissa oleva hiusviivaristikko helpottaa tarkempaa tähtäystä. Kaukoputken lisäksi vaaituskojeessa on myös rasiatasain. (Vermeer 2015, 68–71.)

Tasaimen tehtävä on auttaa mittaajaa saamaan vaaituskojeen tähtäysakseli vaakatasoon eli kohtisuoraan paikallista painovoimaa vasten. Vaaituskojeen karkea taseus suoritetaan siirtämällä ilmakupla rasiatasaimen keskelle. Tämä tapahtuu jalustana toimivan kolmijalan jalkojen pituuksia säätelemällä ja kojeen runkosassa olevia jalkaruuveja pyörittämällä. Taseus suoritetaan uudestaan jokaisella kojeasemalla. (Vermeer 2015, 68–71.)

Vaaituskojeella mitattaessa on otettava huomioon mittauskaukoputken mahdollinen parallaksi-ilmiö. Jotta mittauskaukoputki toimii oikein, täytyy se tarkentaa siten että kohde eli latta näkyy selvästi. Objektiivin kohteesta muodostaman kuvan ja viivaristikon kuvan näkyessä eri tasolla, on kaukoputkessa parallaksia. Tällaisessa tapauksessa kaukoputkella ei voi tähdätä tarkasti, koska mittaajan silmän liikkuaessa liikkuu myös viivaristikko latan suhteen. Parallaksi-ilmiö voidaan poistaa esimerkiksi tähtäämällä kaukoputkella vaaleaan taustaan, jolloin viivaristikko näkyy selkeästi, ja tarkentamalla se siten, että kaukana olevat kohteet näkyvät terävinä. (Price & Uren 2010, 36; Laurila 2012, 22–23.)

Laitevalmistajat tarjoavat vaaituskojeita eri tarkkuusluokkiin. Kojoiden tarkkuus ilmoitetaan yleensä yhden kilometrin edestakaisen vaaituksen keskihajontana. Mittaajan on oltava selvillä siitä, että käytössä oleva vaaituskojeen tarkkuus on sopiva suoritettavaan korkeusmittaukseen. Esimerkiksi rakennusvaaituskojeiden kilometrin edestakaisen vaaituksen keskihajonta 5–15 millimetriä, kun taas tarkkavaaituskojeiden vastaava on alle 0,5 millimetriä. Vaaituskojeet voidaan luoki-

tella tarkkuuden, käyttötarkoituksen ja rakenteen mukaan (Taulukko 1). Mitä tarkempi vaaituskoje on kyseessä, sitä suurempi kaukoputki siinä on. (Laurila 2012, 212–214.)

Taulukko 1. Vaaituskojeiden luokittelu tarkkuuden ja käyttötarkoituksen mukaan (Vermeer 2015, 68)

Kojetarkkuustyyppi	Vaaitustyyppi
Alemman luokan vaaituskoje	Rakennusvaaitus
Keskiluokan vaaituskoje	Insinöörivaaitus
Korkeamman luokan vaaituskoje	Yleisvaaitus
Korkeimman luokan vaaituskoje	Tarkkavaaitus

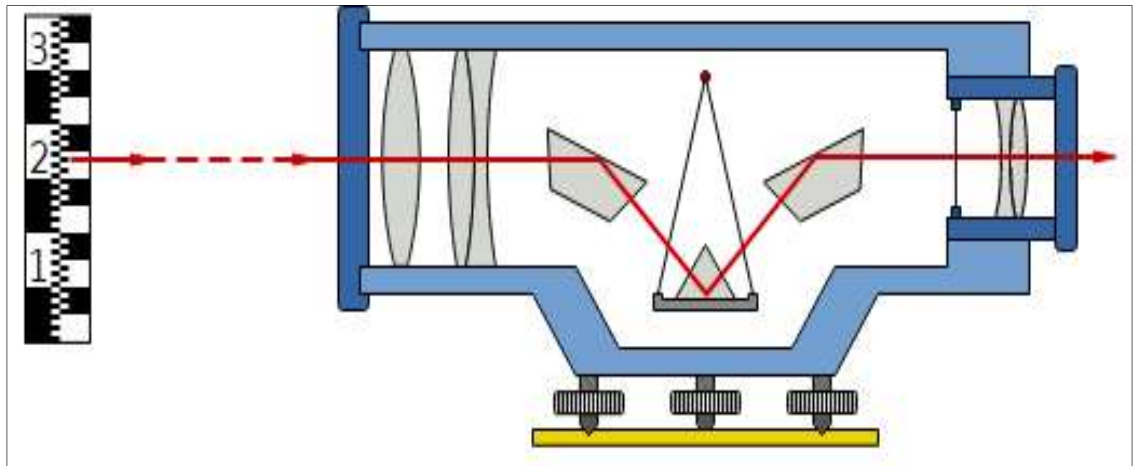
3.3.1 Itsetasaavat vaaituskojeet

Itsetasaavien vaaituskojeiden eli automaattivaaituskojeiden vaakasuuntainen tähtäys perustuu painovoimaan (Vermeer 2015, 73). Kojeessa on karkeaa tasausa varten rasiatasain, mutta se käyttää automaattista kompensattoria (Kuvio 10) tarkkaan tasaukseen. Karkea tasaus on kuitenkin suoritettava ensin, koska kompensattori toimii vain kojeen ollessa jo lähes vaakatasossa. (Price & Uren 2010, 36–37.)

Kompensaattori on yleensä kiinnitettynä mittauskaukoputkeen ja sen tehtävänä on ohjata latasta lähtevä tähtäyssäde vaakasuoraan tähtäysputken viivaristikolle. (Price & Uren 2010, 36–37.) Kaukoputken ollessa hieman kallistuneena vaakatasosta, aiheuttaa tämä sisään tulevalle valonsäteelle kallistuksen. Kompensaattori taittaa valonsädettä, jotta kohteen kuva pysyisi vaakatasossa kaukoputken kuvatasossa. (Vermeer 2015, 73–74.)

Tämä tapahtuu vapaasti ripustetun prisman avulla, joka kääntyy kaukoputken kallistuksen suhteen ja valon heijastussuunta muuttuu. (Vermeer 2015, 73–74.) Näin tähtäysakseli on vaakasuorassa, vaikka teleskooppi itsessään olisi kallistunut. Kompensaattori on suojattu magneettikentän vaikutuksilta. Se on lisäksi

suunniteltu kestämaan sääolosuhteiden muutokset, kojeeseen kohdistuvat iskut ja värinän. (Price & Uren 2010, 36–37.)



Kuvio 10. Kompensaattorin toimintaperiaate (Vermeer 2015, 73–74)

Automaattivaaituskojeella (Kuvio 11) mittaaminen aloitetaan pystyttämällä laite kolmijalan päälle. Kolmijalan jalat on tätä ennen poljettu tukevasti maahan ja se on asetettu silmämääräisesti vaakatasoon, jalkojen asentoa tai niiden pituuksia säätämällä. (Laurila 2012, 210, 220.)



Kuvio 11. Leica NA700-automaattivaaituskoje ja perinteinen vaaituslatta (Merlin Lazer 2016)

Tämän jälkeen koje tasataan vaakatasoon yllä mainitulla tavalla ja sillä tähdätään lattaan. Itsetasaavalla vaaituskojeella korkeuserohavainnot merkitään havaintokirjaan, josta voidaan laskea korkeuserot mittauksen päätyttyä. (Laurila 2012, 210, 220.)

3.3.2 Digitaaliset vaaituskojeet

Itsetasaavilla vaaituskojeilla mitattaessa korkeuserohavainnot joudutaan merkitsemään käsin havaintokirjaan ja laskemaan itse eteen- ja taakselukemien erotukset (Laurila 2012, 217). Digitaalisen vaaituskojeen pystytys, tasaus ja sillä tähtääminen tapahtuu samalla tavalla kuin automaattivaaituskojeella. Ne poikkeavat toisistaan siten, että digivaaituskoje lukee korkeuden latasta automaattisesti ja tallentaa korkeuserohavainnot suoraan kojeen muistiin. Digivaaituskojeella (Kuvio 12) tehty mittaus vaatii perinteisen latan sijasta viivakoodilatan. Latan viivakoodi on periaatteessa samanlainen kuin kauppatavaroiden viivakoodi. (Price & Uren 2010, 40–42.)



Kuvio 12. Leica DNA03-digivaaituskoje

Digivaaituskojetta hallitaan siihen upotetun näytön ja näppäimistön avulla, jolla jokaiselle mitatulle pisteelle voidaan antaa esimerkiksi järjestysnumero. Mittaaminen tapahtuu tähtäämällä kaukoputkella lattaan, jonka jälkeen nappia painamalla koje käyttää sähköistä kuvakäsittelytekniikkaa tunnistakseen teleskoopin näkymää vastaavan latan viivakoodikuvan. Tämän jälkeen koje vertailee tätä kuvan viivakoodia sen muistissa oleviin viivakoodeihin. Oikean viivakoodin löydettyään koje kääntää sen korkeuslukemaksi. Kojen mittaa automaattisesti etäisyyden lattaan, jolloin myös vaaitusjonon kokonaispituuden määrittäminen on helppoa. (Price & Uren 2010, 40–42.)

Hyvissä olosuhteissa digivaaituskojeella on mahdollista mitata noin sadan metrin pituisia tähtäyksiä. Kuitenkin kovassa sateessa tai kirkkaassa auringonpaisteissa tähtäykset ovat huomattavasti tätä lyhyempiä. Myös huono valaistus sekä puiden oksat ja lehdet voivat aiheuttaa ongelmia lattaa luettaessa. Laitteen virtälähteenä toimii ladattava akku, jonka varauksen pitäisi riittää yhden päivän mitauksiin. (Price & Uren 2010, 41–42.)

Jos sähköinen lukeminen lattaan ei onnistu, on latan kääntöpuolella normaali numeroasteikko. Tällöin korkeuslukema voidaan tarvittaessa havaita perinteistä vaaitusmenetelmää käyttäen. Mitatut korkeuserohavainnot on mahdollista viedä koneen muistista irrotettavalle muistikortille, josta ne voidaan edelleen avata tietokoneella tarkasteltavaksi ja muokattavaksi. (Price & Uren 2010, 41–42.)

Digitaalinen vaaituskoje nopeuttaa korkeudenmittausprosessia huomattavasti. Mittaajan ei tarvitse kuluttaa aikaansa havaintojen kirjaamiseen ja korkeuserojen laskemiseen, sillä koje suorittaa tämän muutamassa sekunnissa. Lisäksi tähtäysmatkat voidaan ulottaa pidemmälle kuin paljaalla silmällä on teleskoopin läpi mahdollista nähdä selkeästi. Digitaalisuus eliminoi myös perinteisen vaaituksen yleisimmät virheet, jotka ovat lattalukemien havaintovirheet sekä korkeuksien merkintä- ja laskuvirheet. (Price & Uren 2010, 40–42.)

3.3.3 Tasolaserit

Perinteisten optiikkaan perustuvien vaaituskojeiden lisäksi korkeutta voidaan mitata myös tasolasereilla. Tasolaser tuottaa pyörivän valonsäteen, joka muodostaa vaakasuoran tason. Ne sopivat parhaiten käyttöön rakennustyömaan korkeusmittauksissa. Tasolasereiden tuottama valo on joko ihmissilmin nähtävää tai näkymätöntä infrapunavaloa. (Laurila 2012, 217–218.)

Erityisesti infrapunavaloa tuottavat tasolaserit vaativat tason korkeusaseman havaitsemiseen lattaan kiinnitettävän ilmaisimen. Tasolasereiden lisäksi on tarjolla muitakin laserkojeita. Niiden avulla voidaan muun muassa osoittaa rakennuslinjoja ja asentaa erilaisia putkia. (Laurila 2012, 217–218.)

3.3.4 Vaaituskojeen kalibrointi

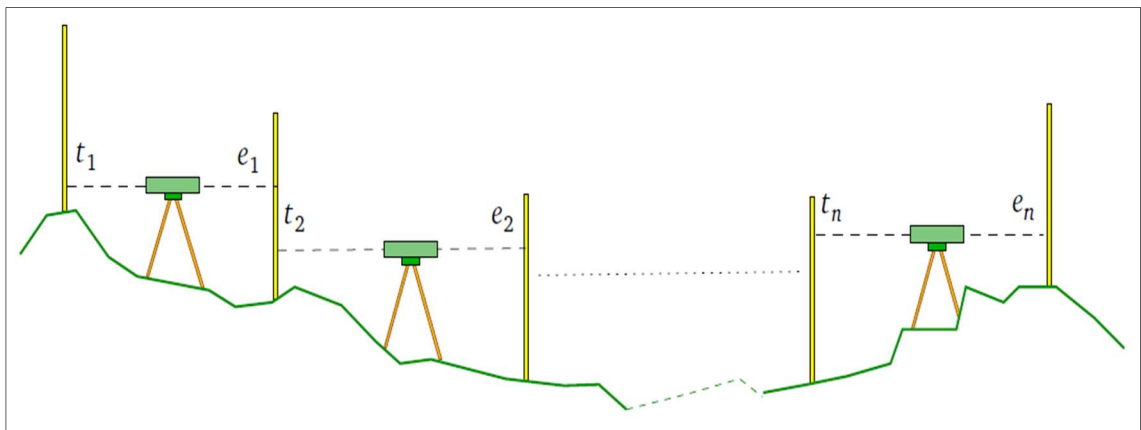
Vaaituskojeella on mahdollista saada oikeita ja luotettavia tuloksia, kun tasauksen suorittamisen jälkeen sen tähtäysakseli on vaakasuorassa. Tämän varmistamiseksi koje pitää kalibroida tasaisin väliajoin. Vaaituskojeen käytöstä aiheutuvat, siihen kohdistuvat väistämättömät kolahdukset ja iskut vaikuttavat mittaus-tarkkuuteen ja – tulosten luotettavuuteen. Tällöin myöskään tähtäysakseli ei ole kohtisuorassa vaaka-akselia vastaan, jolloin puhutaan kojeen kollimaatiovirheestä. (Price & Uren 2010, 42.)

Kollimaatiovirheen poistamiseksi on olemassa erilaisia tarkistusmenetelmiä, joita kutsutaan kaliboinniksi. Vaaituskojeen kalibrointi on suositeltavaa tehdä tasaisin väliajoin ja otettaessa uusi koje käyttöön. Kalibrointikertojen tiheyteen vaikuttaa kojeen käytön määrä ja se, kuinka tarkkoja mittauksia sillä tehdään. (Price & Uren 2010, 42.)

3.4 Jonovaaitus

Mitattavien pisteiden välimatkan ollessa pitkä tai pisteiden sijaitessa suuria korkeuseroja tai näkemäesteitä sisältävässä maastossa, ei pisteiden välisiä korkeuseroja ole mahdollista mitata yhdestä ja samasta kojeasemasta. Vaihtopisteiden kautta eteenpäin vietävää korkeusmittausta kutsutaan jonovaaituksiksi. Siinä korkeutta viedään eteenpäin toistamalla vaaituksen periaatetta, siirtämällä vuoroin lattaa ja vaaituskojetta eteenpäin. (Laurila 2012, 219–220.)

Jonovaaitus (Kuvio 13) aloitetaan aina taaksepäin kulkusuuntaan nähden, lähtöpisteelle tehtävällä tähtäyksellä ja päätetään eteenpäin tähtäykseen päätepisteelle. Vaihtopisteille ei ole tarpeellista määrittää korkeutta vaan ne toimivat pelkästään latan alustoina. Latta-alustana voidaan käyttää esimerkiksi metallista niin sanottua kilpikonaa, jonka päälle latta asetetaan. Eteen- ja taaksetähtäyksien lisäksi mittauksessa voidaan suorittaa myös sivulletähtäyksiä. Sivulletähtäyksellä korkeutta ei viedä eteenpäin, mutta sen avulla voidaan mitata yksittäisten pisteiden korkeuksia. Jonovaaituksella voidaan suorittaa suurienkin alueiden korkeusmittauksia. (Laurila 2012, 219–220, 223–224.)



Kuvio 13. Jonovaaituksen periaate (Vermeer 2015, 78)

Jonovaaitus aloitetaan korkeudeltaan tunnetulta korkeuskiintopisteeltä ja etenee korkeutta siirtäen jonomaisesti siten, että jokaiselta kojeasemalta tehdään taakse- ja eteentähtäys (Laurila 2012, 219). Mittaus on myös suljettava tunnetulle pisteelle tai muuten vaaituksen virheiden määrittäminen ei ole mahdollista (Lau-

mila 2012, 223). Sulkupiste voi myös olla sama kuin lähtöpiste. Lähtö- ja sulkupisteiden väliltä voidaan laskea korkeuksia uusille pisteille. Vaaitusreitti on suunniteltava mahdollisimman helppokulkuiseksi sekä ihannetapauksessa suoritettavaksi tukevalle ja tasaiselle maapohjalle. (Laurila 2012, 219–220, 223–224.)

Kun vaaitusjono on suljettu korkeudeltaan tunnetulle pisteelle, voidaan mittauksen onnistuminen ja tarkkuus määrittää laskemalla sulkupisteen havaitun ja tunnetun korkeuden erotus eli sulkuvirhe. Mittauksen laatua voidaan arvioida laskeamalla sulkuvirheestä vaaituksen arvioitu kilometrikeskivirhe, jonka tulisi olla samaa tarkkuusluokkaa käytettävän mittauskaluston suorituskyvyn kanssa. Pulttivälin suhteellinen korkeuskeskivirhe saadaan jakamalla tasoitettun korkeuseron keskivirhe pulttivälin pituudella ja skaalaamalla tulos miljoonasosiksi. Verkon kokonaislaatua arvioidaan suhteellisen tarkkuuden avulla, jonka yksikkö on ppm. (Laurila 2012, 225–226; Hakala 2014a, 3–5.)

3.5 Tarkkavaaitus

Tarkkavaaitus suoritetaan normaaleja vaaituskojeita tarkemmilla laitteilla ja invarlatoilla. Vaaitus on tarkkavaaitusta, kun mittauskalustolla on mahdollista päästä alle 0,7 mm keskihajontaan kilometrin edestakaisessa mittauksessa. Aikaisemmin tarkkavaaituksissa käytettiin tasainkojeita, joissa on erityinen kaukoputken suuntainen vaaitustasain. Digitaaliset vaaituskojeet ovat kuitenkin nykyään yleisesti käytössä myös tarkkavaaituksia tehtäessä. (Laurila 2012, 215.)

Tarkkavaaituksessa käytettävässä latassa viivajaotus on merkitty invarteräksestä tehtyyn nauhaan, koska kyseisen materiaalin lämpölaajenemiskerroin on hyvin pieni (Laurila 2012, 215). Sää- ja laitevirheiden minimoimiseksi (Vermeer 2015, 79) eteen- ja taaksetähtäyksien tulee olla metrin tarkkuudella yhtä pitkiä (JUHTA 2014b, 1). Pisin sallittu tähtäysetäisyys on 60 metriä, ylemmän luokan linjoissa tämä on enintään 50 metriä (JUHTA 2014b, 1).

4 N2000-TARKKAVAAITUSHANKE

4.1 Korkeusrunkomittaukset

Korkeusrunkomittauksilla mittauspaikalle luodaan halutun järjestelmän mukainen korkeuksien vertailutaso. Yleensä tämä tapahtuu tarkkavaaitsemalla korkeuskiintopisteet tarvittavassa korkeusjärjestelmässä. (Laurila 2012, 222.) Korkeuskiintopisteillä on olemassa oma hierarkiansa. Vuoden 2003 kaavoitusmittausohjeissa ne jaetaan kolmeen luokkaan: valtakunnallisiin kiintopisteisiin sekä kuntien perus- ja käyttökiintopisteisiin (Laurila 2012, 12).

Vaaitsemalla tehdyt korkeusrunkomittaukset suositellaan suoritettavaksi vaaitusverkkona. Vaaitusverkko on laskennallisesti sen verran monimutkainen, että sen tasoittaminen suoritetaan tietokonepohjaisella laskentaohjelmalla. (Laurila 2012, 223.) Korkeuskiintopisteen merkinä käytetään pyöristetty pulttia, josta on selkeästi havaittavissa korkein kohta. Ne on rakennettava liikkumattomiksi. Yleinen korkeuskiintopisteen paikka on kalliossa, maaperäkivessä, betonipilarissa tai muussa kiinteässä rakenteessa. (Laurila 2012, 8–9.)

4.2 Hankkeen kulku

Tuusulan kunnassa suoritettiin kesällä 2015 korkeusjärjestelmän päivitys. Tämä sai alkusysäyksensä kunnan ilmoittaessa halukkuutensa siirtyä aiemmin käyttämästään N43-järjestelmästä, uuteen valtakunnalliseen N2000-korkeusjärjestelmään. Kunnan korkeuskiintopisteet tarkkavaaittiin uuden järjestelmän mukaisina korkeuksina, jonka jälkeen voitiin suorittaa liitos N2000-järjestelmään.

Hankkeen vaaitusverkko suunniteltiin siten, että vaaitusjonot voitiin mitata korkeudeltaan tunnetulta pisteeltä toiselle tai muodostaen suljetun renkaan. Verkko jaettiin suunnitteluvaiheessa etelä- ja pohjoisverkkoon. Eteläverkko sijoittui pääosin Hyrylän alueelle ja pohjoisverkko käsitti Jokelan ja Kellokosken. Näiden kah-

den osaverkon perustana oli 27 valtakunnallista korkeuskiintopistettä, jotka toimivat vaaituslinjojen lähtöpisteinä. Lisäksi vaaituslinjoihin sisällytettiin liitokset naapurikuntien, Järvenpään, Keravan ja Vantaan, korkeuspisteisiin. Hankkeen tarkkavaaitustyöstä vastasi Destia Oy ja vaaitusverkon tasoituslaskennasta Geopixel Oy.

Vaaitustyö aloitettiin eteläverkon mittaamisesta, josta edettiin järjestelmällisesti etukäteen suunniteltuja vaaitusreittejä mukaillen pohjoisverkkoon. Ennen varsinaisen vaaitustyön aloittamista Tuusulan kunta oli käynyt näkövöittämissä vaaittavat pisteet. Koska kartalle suunnitellut vaaitusreitit osoittivat käytännössä vain mitattavien pisteiden järjestyksen ja mittaussuunnan, vaati mittauksissa eteneminen myös hieman suunnistustaitoja.

Korkeutta pyrittiin siirtämään eteenpäin päällystettyjä teitä pitkin aina kuin se vain oli mahdollista. Vaaituskoneen pystyttäminen vakaille ja tasaisille pohjille on kannattavaa, koska tällöin kojeen sekä kilpikonnän liikkumisen riski kesken mittauksen pienenee. Lisäksi suuria korkeuseroja sisältäviä vaaitusreittejä pyrittiin välttämään, koska tällaisissa tapauksissa tähtäyksien pituudet kojeesta lattaan lyhenivät huomattavasti.

Todellisuudessa vaaitusjonoja pystyttiin harvemmin mittaamaan tällaisia optimireittejä pitkin. Usein vaaittavat pisteet sijaitsivat korkealla ja tukevalla maastonkohdalla, joten varsinkin taajama-alueen ulkopuolella kojetta jouduttiin siirtämään välillä huonokulkuisempia reittejä kuten metsäpolkuja ja pururatoja käyttäen. Maaston korkeuseroista ja säästä riippuen mittaukset etenivät päivässä noin 1–10 kilometriä. Tähtäysetäisyydet olivat julkisen hallinnon suositusten mukaisia.

Vaaitusten edetessä, mitatut korkeuserohavainnot syötettiin XPLocal-tasointiohjelmaan. Näin korkeuserohavainnointia pystyttiin kontrolloimaan ja mittauksien laadua pystyttiin valvomaan tehokkaasti rinnakkain hankkeen etenemisen kanssa. Kun kaikki tarvittavat pisteet oli saatu vaaittua, suoritettiin korkeuserohavainnoille lopullinen tasoitus mainitulla tasoitusohjelmalla. Etelä- ja pohjoisverkkojen kor-

keudet tasoitettiin erikseen ja lopputuloksena saatiin pisteille N2000-korkeusjärjestelmän mukaiset korkeudet. Yhteensä vaaitusreittien pituudeksi tuli 184 kilometriä ja uusia vaaittuja pisteitä oli 211 kappaletta.

Molemmat tasoitetut tarkkavaaitusverkot täyttävät, julkisen hallinnon suosituksen mukaisen, vaaituksen suhteellisen tarkkuuden vaatimuksen 5 ppm tai parempi (JUHTA 2014a, 8). Yleensä ottaen koko hanke sujui hyvin ja vaaditun tarkasti. Eteneminen oli sujuvaa ja kovinkaan monta pisteväliä ei jouduttu uusimaan.

Hyvästä lopputuloksesta huolimatta vaaitushankkeen aikana ilmeni myös joitain ongelmia. Hankkeen tilaajana olleen Tuusulan kunnan toimesta vaaittavat pisteet oli tehty maalilla ja huomionauhalla näkyväksi maastoon. Todellisuudessa tämä kuitenkin vaihteli merkittävästi. Tästä syystä päädyttiin ratkaisuun, että jokainen vaaittava piste käydään varmistamassa ennen vaaituksen alkamista. Jonkun verran ongelmia aiheutti myös kehnohko kommunikaatio tilaajaorganisaation ja mittausryhmän välillä. Oli esimerkiksi tilanteita, joissa pisteitä oli poistettu vaaitussuunnitelmasta. Tieto tästä ei ollut kulkeutunut mittaryhmällä asti, mikä aiheutti turhia, vaaittaviksi tarkoittamattomien pisteiden etsintöjä.

Lisäksi ongelmia aiheutti joidenkin pisteiden hankala sijainti. Osa vaaittavista pisteistä sijaitsi esimerkiksi korkean kallion päällä, jolloin niiden mittaaminen vaakalta alustalta osoittautui vaikeaksi tai mahdottomaksi. Koje jouduttiin pystyttämään metsään tai muulle epävakaammalle maapohjalle, joka luonnollisesti kasvatti vaaituksessa tehdyn karkean virheen mahdollisuutta. Ongelmaksi muodostuivat myös sellaiset pisteet, jotka olivat talojen kivijalkoihin kiinnitetyjä korkeuspultteja. Lähes aina rakennuksen ulkoverhous esti latan suoraan saamisen tällaisen korkeuspisteen päälle ja näin sitä ei voitu mitata.

Ajoittain myös sääolot vaikeuttivat kojeen lukemista lattaan. Varsinkin aamuisin auringon paistaessa matalalla, joko auringonsäteet häikäisivät kojeen näkymän lattaan tai lattaan muodostui puiden ja muun kasvillisuuden varjoja. Nämä vaikeuttivat kojeen korkeuden lukemista. Lisäksi rankka vesisade aiheutti välillä on-

gelmia vaaitustyötä tehdessä. Pariin otteeseen pisteen hankalan sijainnin ja epäsuotuisan sään yhdistelmä aiheutti sen, että vaaituskoje luki korkeuden väärin. Tämä aiheutti vaaitusjonoon niin suuren virheen, että kyseinen pisteväli oli mitattava uudestaan.

Tärkeimpänä huomiona tarkkavaaitustyöstä jäi itselleni mieleen se, että tarkkuus ja huolellisuus ovat ensijaisia mittauksen suoritusnopeuteen nähden. Sillä vaikka itse mittaaminen on teknisesti erittäin helppoa ja se tapahtuu digitaalisesti, on huolimattomuusvirheiden tekeminen mahdollista. Etenkin, jos pitää liian suurta kiirettä ja eikä ajattele mitä tekee. Toinen tärkeä huomionkohde on korkeuden kiinnittäminen vakaisiin ja liikkumattomiin kohteisiin, kun mittauksissa päätetään pitää tauko. Hyviä paikkoja ovat esimerkiksi kiinteisiin rakenteisiin kiinnitetyt pultit.

Vaaitusta suorittavien mittaajien on kiinnitettävä huomioita siihen, että heillä on oikea asenne työn tekemiseen. Ainakin itselleni vaaittavan alueen laajuus tuntui hankkeen alkuvaiheessa, ylitsepääsemättömän suurelta. Kuitenkin hankkeen edetessä ja tarkkavaaitusprosessin tullessa itselle paremmin tutuksi, huomasin oikean asennoitumisen helpottavan vaaituksen suorittamista. Kuin huomaamatta muutaman viikon vaaitusten jälkeen, jäljellä oleva työurakka ei enää tuntunutkaan niin suurelta.

Vaaitusreitin yksityiskohtainen suunnittelu ja vaaittavien pisteiden läpikäyminen kannattaa, jotta ikäviltä yllätyksiltä vältytään. Ei voida myöskään ajatella, että mitauskoje on erehtymätön laite, joka antaa aina oikeita lukemia. Tämän vuoksi kojeen säännöllinen kalibrointi on tärkeää. Lisäksi kenttäkirjanpidolla voidaan jo mitausvaiheessa huomata mahdolliset karkeat virheet korkeuserohavainnoissa. Vaaitustyön sujuvuuden kannalta paras mittausolosuhde on valoisa vuorokaudenaika ja pilvinen sää.

4.3 Vaaitusverkon suunnittelun ja toteutuksen periaatteet

Vaaitusverkko muodostaa perustan korkeusjärjestelmälle. Verkon laatua määrittävät kaksi tekijää, tarkkuus ja luotettavuus. Tarkkuuden määrittää oikeanlaisen mittauskaluston ja vaaitusmenetelmän valinta. Vaaitusverkosta tekee luotettavan sen hyvä rakenteellinen suunnittelu, jossa ihannerakenne on runsassilmukkinen verkko. (Hakala 2016b, 3–5.)

Kolmas vaaitusverkon suunnitteluun vaikuttava tekijä on taloudellisuus. Verkko on suunniteltava siten, että sen toteuttaminen olisi mahdollisimman kustannustehokasta. Tämä tarkoittaa vaaitusten suorittamista yksisuuntaisina, vaikka edestakaiseen vaaitukseen perustuvasta verkosta virheiden paikantaminen olisi helpompaa. Vaaitusverkkojen suunnittelu ja toteuttaminen vaativat erityistä tietotaitoa sekä hyvää ymmärrystä geodeettista mittauksista ja tasoituslaskennasta. (Hakala 2016b, 3–5.)

4.3.1 Vaaitusverkon tarkkuus

Vaaitusverkon tarkkuuskäsite jakautuu sisäiseen ja ulkoiseen tarkkuuteen. Sisäinen tarkkuus kuvaa korkeushavaintojen keskinäistä yhteensopivuutta eli hajontaa. Vaaituksessa ja muissakin geodeettisissa mittauksissa sisäisen tarkkuuden määrittämiseen käytetään yleensä havaintosarjan keskivirhettä ja se sisältää vain satunnaisvirheen vaikutuksen. Hyvän sisäisen tarkkuuden tunnusluku on havaintojen pieni hajonta. Ulkoisen tarkkuuden määrittää havaintojen ja mitattavan suureen todellisen arvon keskinäinen yhteensopivuus. Se sisältää satunnaisten ja systemaattisten virheiden vaikutuksen. (Hakala 2016b, 7.)

Mitattavan suureen absoluuttista arvoa ei voida määrittää. Tämä johtuu sääolojen vaihteluista sekä kojeen, havaitsijan ja laskennan virheistä. Ulkoista tarkkuutta voidaan parantaa laskemalla useista riippumattomista mittauksista sarjakeskiarvo, joka edustaa suureen absoluuttista arvoa tarkemmin yksittäisen havain-

non asemasta. Kaikissa geodeettisissa mittauksissa pyritään sekä hyvään sisäiseen, että ulkoiseen tarkkuuteen. Hyvä sisäinen tarkkuus voidaan saavuttaa huolellisella havaintotyöllä ja hyvään ulkoiseen tarkkuuteen päästään hyvillä ja laadukkailla havainnoilla, joissa ei ole systemaattista virhettä eli havaintoihin on tehty kaikki tarpeelliset geometriset ja fysikaaliset reduktiot. (Hakala 2016b, 8–9.)

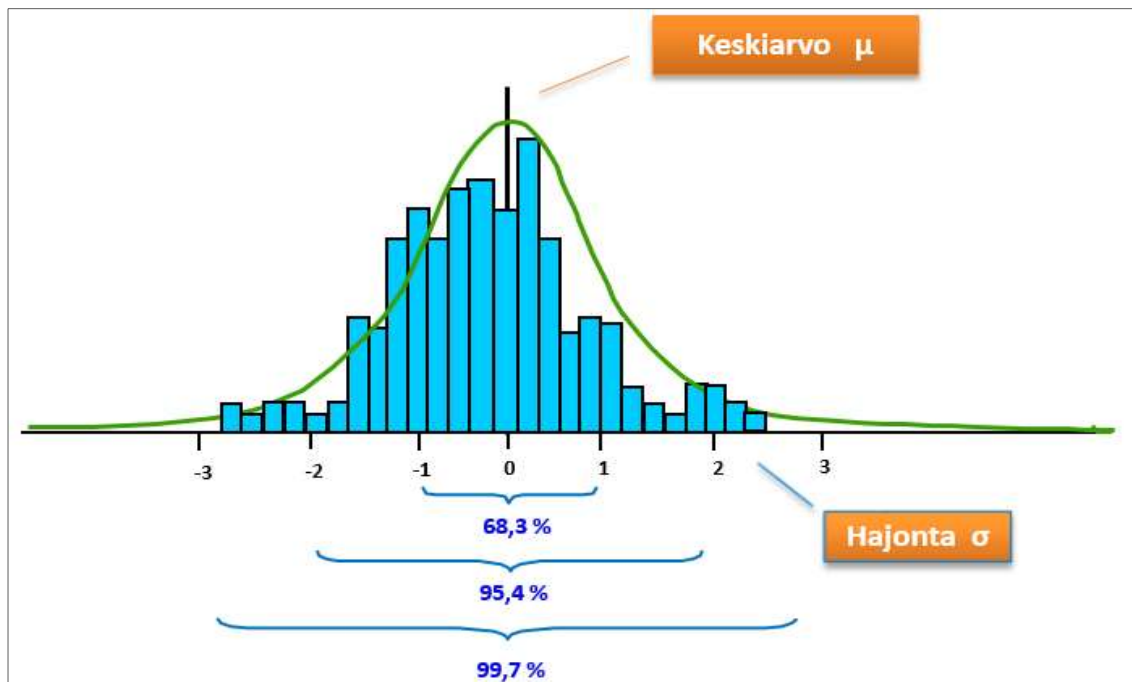
Geodeettisen verkon tarkkuus muodostuu havaintojen tarkkuudesta sekä verkon rakenteesta, jossa saavutetaan parhaat tulokset verkkomaisella tai silmukkamaisella rakenteella. Korkeuden tarkkuus voidaan esittää korkeuskeskivirheenä ja suhteellisenä korkeuseron keskivirheenä. (Hakala 2016b, 23.) Keskivirhe on tarkkuuden tunnusluku, joka kertoo satunnaisten virheiden arvioidun suuruuden tietyllä todennäköisyydellä (Laurila 2012, 36). Tätä todennäköisyyttä kuvaa normaalijakauman tiheysfunktio (Kuvio 14).

Normaalijakauman tiheysfunktiossa suurin osa havainnoista osuu lähelle keskiarvoa (μ). Keskihajonta (σ) kertoo havaintojen vaihtelun eli satunnaisvirheiden keskimääräisen suuruuden todennäköisyyden. Korkeuskeskivirheen suuruuden todennäköisyys havainnollistetaan normaalijakaumassa varmuusalueilla. Vaaitusverkon tarkkuus määritellään JHS185-ohjeistuksen mukaisesti suhteellisenä tarkkuutena (Kaava 2), jonka yksikkö on miljoonasosa, ppm. Hyväksytyn vaaitusverkon jokaisen pulttivälin tulee täyttää annettu tarkkuusvaatimus. Pulttivälin suhteellinen tarkkuus lasketaan

$$ppm = 10^3 \times \frac{m_{\Delta H}}{S}, \quad (2)$$

missä

$m_{\Delta H}$	on	tasoitettun korkeuseron keskivirhe (mm)
S	on	pulttivälin eli vaaitun matkan pituus (m). (Hakala 2016b, 30.)



Kuvio 14. Normaalijakauman tiheysfunktio, varmuusalueet on esitetty kuvan alareunassa (Hakala 2016b, 62)

4.3.2 Vaaitusverkon luotettavuus

Vaaitusverkon luotettavuus voidaan jakaa sisäiseen ja ulkoiseen luotettavuuteen. Hyvä sisäinen luotettavuus saavutetaan suunnittelemalla vaaitusverkko rakenteeltaan verkkomaiseksi, jolloin siitä voidaan paljastaa karkeat virheet niistä havainnoista, joissa ne ovat syntyneet. Karkean virheen testaus perustuu tilastomatematiikkaan ja se on täysin automaattinen. Hyvän rakenteen omaavassa verkossa karkeat virheet tulevat esiin niihin liittyvien havaintojen jäännösvirheissä, eivätkä katoa tasoitustuloksiin. (Hakala 2016b, 34.)

Geodeettinen verkko on ulkoisesti luotettava, kun se on suunniteltu niin sanotusti vastustamaan virhetestissä löytymättä jääneiden karkeiden virheiden vääristävää vaikutusta tasoitettuihin korkeuksiin. Vastaavasti huonolla verkkosuunnittelulla voidaan joutua tilanteeseen, jossa tasoituksen tuloksena saadaan näennäisesti tarkkoja koodinaatteja, mutta väärästä paikasta. (Hakala 2016b, 35–36.)

Perussääntö hyvälle vaaitusverkolle on, että se sisältää mahdollisimman paljon lenkkejä ja solmupisteitä. Tällainen rakenne tuo automaattisesti mukanaan ylimääritystä eli redundanssia, joka on vaaitusverkon tärkein laatutekijä. Lisäksi vaaitusverkko on muodostettava siten, että sen ulommaiset lähtöpisteet muodostavat monikulmion, jonka sisään vaaittavat pisteet jäävät mahdollisimman kattavasti. Lähtöpisteille ei saisi olla yhdensuuntaista piikkimäistä liitosta muuten silmukkamaisesta verkosta, koska piikkinä mitatun jonon havaintoihin ei liity mitään kontrollia. Kun nämä ehdot täyttyvät, virheiden kasautuminen verkossa tapahtuu optimaalisella tavalla. Näin tulokseksi saadaan mahdollisimman tasalaatuinen korkeusrunkopisteistö. (Hakala 2016b, 37–40.)

Vaaitusverkolle saadaan siis ylimääritystä, kun havaintoelementtien lukumäärä on suurempi kuin laskettavien parametrien määrä (Kaava 3). Verkkomainen rakenne parantaa automaattisesti vaaitusverkon ylimääritystä. Tällöin jokaiseen pisteeseen kohdistuu vähintään kaksi havaintoa, jotka kontrolloivat toisiaan. Suurella ylimäärityksellä löydetään havaintojen karkeat virheet ja estetään niiden vääristävä vaikutus tasoitettuihin korkeuksiin. Ylimääritys lasketaan

$$R = n - u, \quad (3)$$

missä

R	on	redundanssi eli ylimääritys
n	on	havaintoelementtien lukumäärä
u	on	laskettavien parametrien lukumäärä. (Hakala 2016b, 37.)

Koko vaaitusverkon ylimääritys eli redundanssi koostuu paikallisten redundanssien summasta. Paikallinen redundanssi lasketaan tasoituksessa erikseen jokaiselle havainnolle ja se kuvastaa verkon havaintojen kontrolloitavuutta. Pienimmän neliösumman menetelmän mukaisessa tasoituksessa karkeat virheet pyrkivät vaikuttamaan vääristävästi tasoitettuihin korkeustuloksiin. Paikallinen redundanssi kuvaa korkeuserohavaintojen käyttäytymistä tasoituksessa ja helpottaa verkon hallitsemista.

Paikallinen redundanssi esittää, prosentuaalisesti, kuinka suuri osa havainnon mahdollisesta karkeasta virheestä näkyy kyseisen havainnon jäännösvirheessä tasoituksen jälkeen ja osoittaa täten verkon heikot kohdat. Paikallisen redundanssin avulla voidaan havainnolle laskea arvioitu karkea virhe (Kaava 4), joka jäännösvirhettä realistisempi tunnusluku vaaitusverkon virhetarkasteluun. (Hakala 2016b, 38–41.) Jäännösvirhe saadaan havaitun ja lasketun korkeuden erotuksena. Jäännösvirhe määritellään usein vastakkaismerkkisenä. Näin jäännösvirhe voidaan tulkita havainnon korjaukseksi. (Laurila 2012, 75–76.) Arvioitu virhe lasketaan

$$e_{ij} = \frac{-v_{ij}}{r_{ij}}, \quad (4)$$

missä

e_{ij}	on	arvioitu virhe
v_{ij}	on	jäännösvirhe
r_{ij}	on	paikallinen redundanssi (Hakala 2016b, 41).

4.4 Tasoituslaskenta

Tasoituslaskenta on osallisena monessa vaaitusprosessin vaiheessa. Ennen varsinaisia mittauksia runkopisteverkoston tarkkuus ja luotettavuus voidaan määrittää verkon rakenteen ja havaintojen tarkkuuden perusteella. Varsinaisessa mitausvaiheessa tasoituslaskentaa käytetään mitausten laadunvalvontaan ja korkeuserohavaintojen kontrolloimiseen. Suurinta osaa tasoituslaskenta kuitenkin näyttelee vaaituksen päätyttyä, kun korkeuserohavainnoille lasketaan tasoitetut korkeudet. Tasoituslaskennalla voidaan myös analysoida ja arvioida tasoitustuloksia. Vaaitusprosessin päätyttyä siitä tehdään raportti, johon tasoituslaskennan suorittava tasoitusohjelma tuottaa laskentaraportin. (Kallio 1998, 1.)

Esittelemässäni vaaitushankkeessa tasoitusohjelmana käytettiin XPLocal-ohjelmaa. Viralliselta nimeltään Local X-Positioning System on X-Positionin verkkotasoitushjelma, jota käytetään maastohavaintojen käsittelyyn. Sillä voidaan suorittaa mittausdatan esikäsittely, koordinaattien likiarvolaskenta sekä korkeuksien ja tasokoordinaattien tasoitus. (X-Position 1998.)

4.4.1 Havainnoissa esiintyvät virheet

Mittavan suureen absoluuttinen arvo on aina tuntematon. Tämä johtaa siihen, että myöskään todellisen virheen suuruutta ei voida tarkasti määrittää. Virhe ja tarkkuus ovat keskenään kääntäen verrannollisia. Virheet voivat myös peittää ja kompensoida toistensa vaikutuksia. Mittaushavainnossa on aina virheellisyyttä, esimerkiksi kojeesta, mittausolosuhteesta tai mittaajasta johtuen. Virheet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: karkeisiin, systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. (Hakala 2016b, 11–13.) Mittauksissa pyritään aina siihen, että havainnoissa esiintyisi vain satunnaisia virheitä (Laurila 2012, 36).

Karkeat virheet kohdistuvat yksittäisiin havaintoihin. Ne aiheutuvat yleensä mittaajan erehdyksen, viallisen mittauslaitteen tai poikkeavan olosuhteen vaikutuksesta. (Laurila 2012, 35.) Karkeat virheet voidaan paljastaa ja välttää huolellisella ja asianmukaisella mittaamisella sekä hyvällä verkon suunnittelulla. Ne tulisi havaita ja poistaa jo mittausvaiheessa. Laskentavaiheeseen päätyneet karkeat virheet paljastetaan tilastollisella testaamisella. (Hakala 2016b, 15.)

Systemaattiset virheet esiintyvät ja vaikuttavat kaikkiin samaan joukkoon kuuluvissa havainnoissa. Niiden toistuvuus on samanlaista ja ne eivät paljastu, vaikka mittaus suoritettaisiin uudestaan. Systemaattiset virheet johtuvat yleensä virheellisestä kojeesta, havaintomenetelmästä tai laskentamenetelmästä. Systemaattiset virheet voidaan välttää huoltamalla ja kalibroimalla mittauslaite säännöllisesti sekä käyttämällä hyväksi havaittuja ja asianmukaisia havainto- ja laskentamenetelmiä. (Hakala 2016b, 16–19.)

Satunnaiset virheet tuovat havaintoihin eroavaisuutta, vaikka mittausolosuhteet ja – ajankohta pysyvät samoina (Laurila 2012, 35). Ne kohdistavat kaikkiin havaintoihin ennalta arvaamattomalla tavalla ja niiden syntymistä ei voida estää. Satunnaisvirheet ovat yleensä normaalijakautuneita ja niiden suuruus riippuu mittauskalustosta, mittaajasta tai mittausolosuhteesta. Niiden vaikutusta voidaan vähentää käyttämällä tarkempia mittauskokoja tai toistamalla havaintoja useita kertoja. (Hakala 2016b, 20–21.) Kun havaintoja toistetaan, voidaan laskea havaintojen keskiarvon keskivirhe (Kaava 5)

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{n}}, \quad (5)$$

missä

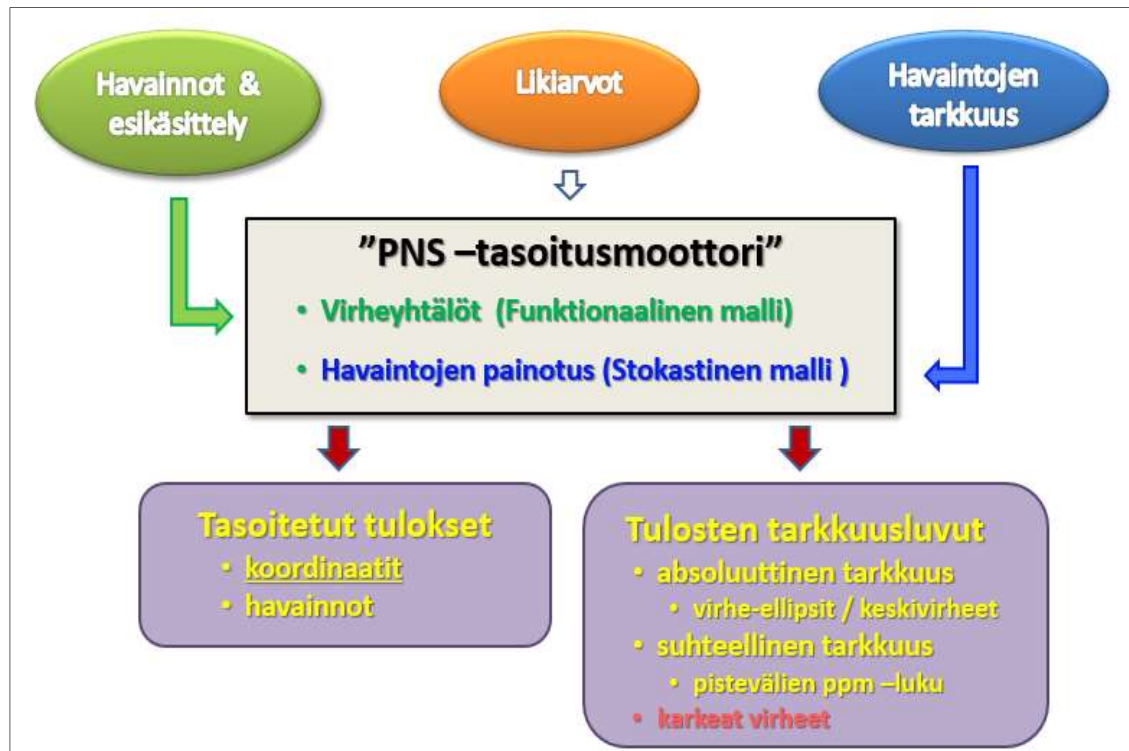
s_x	on	keskiarvon keskivirhe
s	on	havainnon satunnaisia virheitä kuvaava keskivirhe
n	on	havaintojen lukumäärä (Laurila 2012, 37–38).

4.4.2 PNS-tasointus

Tasointutapa on sopimus siitä, miten havaintojen yhteensovitus suoritetaan. Yleisin mittauksissa tasointukseen käytetty menetelmä on pienimmän neliösumman tasointus. (Kallio 1998, 6.) Se pyrkii ottamaan kaikki mittaushavainnot mahdollisimman hyvin huomioon, hakemalla tasapainon etukäteen tehdyn virhearvion ja toteutuneiden virheiden välille (Laurila 2012, 75–77). Tasointutapa perustuu tilastomatematiikkaan ja virheiden kasautumislakeihin. Sen käytön edellytys on riittävä redundanssi eli ylimääritys. PNS-verkkotasointuksessa yleensä ratkaistaan iso yhtälöryhmä ja laskennassa käsitellään samanaikaisesti verkon kaikkien korkeuserohavaintojen sekä korkeuslähtöpisteiden informaatio. (Hakala 2016b, 43–44.)

Tasointuksen tuotteena saadaan tuntemattomille parametreille lasketut arvot ja tarkkuudet havainnoista. Tasointusprosessiin (Kuvio 15) kuuluu aina havaintojen ja tuntemattomien parametrien välisen yhteyden kertova, funktionaalinen malli ja

stokastinen malli, jossa havaintojen kovarianssimatriisilla saadaan havaintojen tarkkuus. (Kallio 1998, 6.)



Kuvio 15. "PNS-tasointimoottori", tasointiprosessin vaiheet pääpiirteittäin (Hakala 2016b, 26)

Tasointuksessa käytettävä painotus perustuu havaintojen tarkkuuden arvioimiseen. Havaintojen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä on useita. Näitä ovat muun muassa havaintokoje ja – menetelmä, sääolosuhde ja mitattavien pisteiden välimatka sekä havaitsija. Paino lasketaan automaattisesti kullekin havainnolle annetun tarkkuusinformaation mukaisesti ja se on kääntäen verrannollinen havainnon varianssiin (Kaava 6). Paino lasketaan

$$p_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}, \quad (6)$$

missä

p_i	on	havainnon paino
σ_0^2	on	a priori varianssikerroin

σ_t^2 on havainnon varianssi. (Hakala 2016b, 44–46.)

Latinan termillä "a priori" tarkoitetaan etukäteen valittua vertailuarvoa ja sen lukuarvo on vapaasti valittava. Tavallisesti sille annetaan laaduton luku yksi (1,0). A priori varianssikertoimen avulla tasoituslaskentaohjelmissa testataan mittauksen virheiden olettamuksia. Varianssi on keskihajonnan eli keskivirheen neliö. (Laurila 2012, 76.)

Oikeanlaisen painotuksen määrittäminen on tärkeää, jotta saadaan aikaiseksi tasapainoinen verkkotasoitus. Esimerkiksi liian pienet painot aiheuttavat havaintoihin tarpeettoman suuria korjauksia, ja päinvastoin. Oikean painotuksen määrittäminen on tasoituksen laskijan tärkeä tehtävä. Vaaitusverkon tasoituksessa havaintojen tarkkuutta voidaan arvioida tarkastelemalla pulttivälien sulkuvirheitä. (Hakala 2016b, 46.) Sulkuvirheestä tasoituksen suorittaja saa laskettua kullekin välille kilometrikeskivirheen (Kaava 7). Myös vaaituskojeen valmistajan ilmoittama tarkkuusarvo on hyvä suuntaviiva painotuksen suuruuteen. (Hakala 2014a, 4–8).

Näiden kahden eri tavalla lasketun keskivirheen tulisi suurin piirtein vastata toisiinsa. Hyvillä havainnoilla ja oikeanlaisella painotuksella PNS-tasoitus tuottaa yksiselitteiset ja todennäköisimmät arvot tasoitettaville suureille (Hakala 2016b, 46). Kilometrikeskivirhe lasketaan

$$m_0 = \frac{w}{\sqrt{S}}, \quad (7)$$

missä

m_0	on	kilometrikeskivirhe
w	on	sulkuvirhe (mm)
S	on	vaaittu matka (km) (Hakala 2014a, 4).

Määrittämisen jälkeen voidaan suorittaa itse tasoitus. Varsinaiset tuntemattomat ja jäännösvirheet ratkaistaan PNS-tasoituksessa minimoimalla jäännösvirheiden

painotettu neliösumma (Kaava 8). (Laurila 2012, 76–77.) PNS-tasoituksen mukainen, funktionaalisen mallin ratkaisu saadaan, kun minimoitava funktio saa ratkaisukohdassa minimiarvonsa ja funktionaalinen malli toteutuu tasoitetuilla havaintoarvoilla ja tuntemattomien estimoiduilla arvoilla. Funktionaalisen mallin ratkaisu haetaan minimoimalla matriisimuodossa oleva funktio

$$\Phi = \mathbf{v}^T \times \mathbf{P} \times \mathbf{v}, \quad (8)$$

missä

P	on	painomatriisi
v	on	jäännösvirhevektori. (Laurila 2007, 9.)

Tasoituksen tuloksena saadaan arvot tuntemattomille, jäännösvirheet ja tasoitettavat havainnot sekä tasoitettu varianssi. Tasoitettu varianssi ($\hat{\sigma}_0^2$) kuvaa tasoitukseen sisällytettyjen havaintojen laatua (Hakala 2016b, 59) ja se on a priori varianssikerrointa (σ_0^2) vastaava vertailusuure (Laurila 2012, 77). Näitä kahta varianssikerrointa vertailemalla, voidaan tilastomatematiikan keinoin testata (Kaava 9) havaintojen ja laskentatulosten tarkkuusarvioiden oikeellisuutta (Laurila 2012, 77). Varianssisuhteen testi suoritetaan

$$\chi_r^2 = \frac{r \times \hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}, \quad (9)$$

missä

χ_r^2	on	varianssisuhteen testiluku
r	on	ylimääritys eli redundanssi
$\hat{\sigma}_0^2$	on	tasoitettu varianssi
σ_0^2	on	a priori varianssi (Hakala 2016b, 60).

Jos vertailusuureet eivät testin mukaan poikkea tilastollisesti merkittävästi toisistaan, on pienimmän neliösumman mukainen tasointu onnistunut. Tällöin on havaintojen etukäteen arvioidut keskihajonnat ja tasointuksesta saadut jäännösvir-

heet ovat tasapainossa keskenään. (Laurila 2012, 77.) Vastaavasti, jos laskentaohjelma ilmoittaa testin epäonnistuneen, joudutaan tekemään korjaustoimenpiteitä. Testin epäonnistumiseen johtavia syitä ovat esimerkiksi havainnoille annettu liian optimistinen tai pessimistinen tarkkuusarvio eli painotus ja/tai havainnoissa tai lähtöpisteissä oleva yksi tai useampi karkea virhe. (Hakala 2016b, 60.)

Jos tullaan johtopäätökseen, että verkossa on yksi tai useampi karkea virhe, on tasoitusohjelmassa olemassa ”data snooping”-toiminto. Sen avulla karkean virheen sijainti verkossa voidaan määrittää edestakaisin vaaitussa verkossa havainnon tarkkuudella. Yhteen suuntaan vaaitussa verkossa virheen paikallistaminen onnistuu vain jonon tai verkon osan tarkkuudella, koska siinä on huomattavasti pienempi redundanssi. Data snooping perustuu laadullisten jäännösvirheiden standardoimiseen, jossa jokaiselle havainnolle lasketaan testisuure. Se kertoo havainnon poikkeaman normaalijakaumasta (Kaava 10). Testille voidaan asettaa raja-arvot, esimerkiksi taulukon 2 mukaisesti. Laskentaohjelma tekee, tasoituksen jälkeen, listauksen karkeista virheistä, josta myös testisuure löytyy. Testisuure lasketaan

$$t = \frac{v_i}{m_{v_i}}, \quad (10)$$

missä

t	on	testisuure
v_i	on	havainnon jäännösvirhe
m_{v_i}	on	jäännösvirheen keskivirhe. (Hakala 2016b, 63.)

Taulukko 2. Data snooping-toiminnon esimerkkirajat (Hakala 2016b, 63)

Testisuure (t)	Varmuusalue	Toimenpide
$t < 1,96$	$< 95 \%$	Havainto OK
$1,96 < t < 2,80$	$95 \% - 99,5 \%$	Varoitus, ei aiheuta toimenpiteitä
$t > 2,80$	$> 99,5 \%$	Havainnon hylkääminen

Verkkolaskentaohjelma mahdollistaa tasoituksen tekemisen joko kytketyssä tai vapaassa verkossa. Kytketyn verkon tasoituksessa on mukana sekä havainnot että kiinteät tai painotetut lähtöpisteet. Kiinteitä lähtöpisteitä käsitellään oletuksella, että ne ovat virheettömiä, eikä niille anneta mitään korjauksia. Tällaisen tasoituksen ongelmana on se, että karkeiden virheiden löytäminen ja paikantaminen vaikeutuvat, jos niitä on sekä lähtöpisteissä että havainnoissa. Lisäksi huonot lähtöpisteet voivat vääristää muuten hyvin mitattuja verkon havaintoja. (Hakala 2016b, 64.)

Kytketyn verkon tasoitus voidaankin tällaisissa tilanteissa tehdä muuten samalla lailla kuin normaalistikin, mutta lähtöpisteille annetaan painotus ja niitä käsitellään tasoitettavina korkeushavaintoina. Karkean virheen kontrolli voi löytää silloin karkeita virheitä havaintojen lisäksi myös lähtöpisteistä ja huonot lähtöpisteet poistetaan tasoituksesta. Näin uusi verkko asettuu optimaalisesti lähtöpisteisiin nähden. Tasoitus voidaan tehdä myös vapaassa verkossa, jossa on mukana pelkät havainnot ilman lähtöpisteitä. Tällöin voidaan varmistua havaintojen keskinäisestä tasapainosta ja oikeanlaisesta havaintojen painotuksesta sekä hyvästä verkon rakenteesta. Erottamalla lähtöpisteet ja havainnot tasoituksessa toisistaan, pystytään niiden karkeat virheet erottelemaan paremmin. (Hakala 2016b, 65–66.)

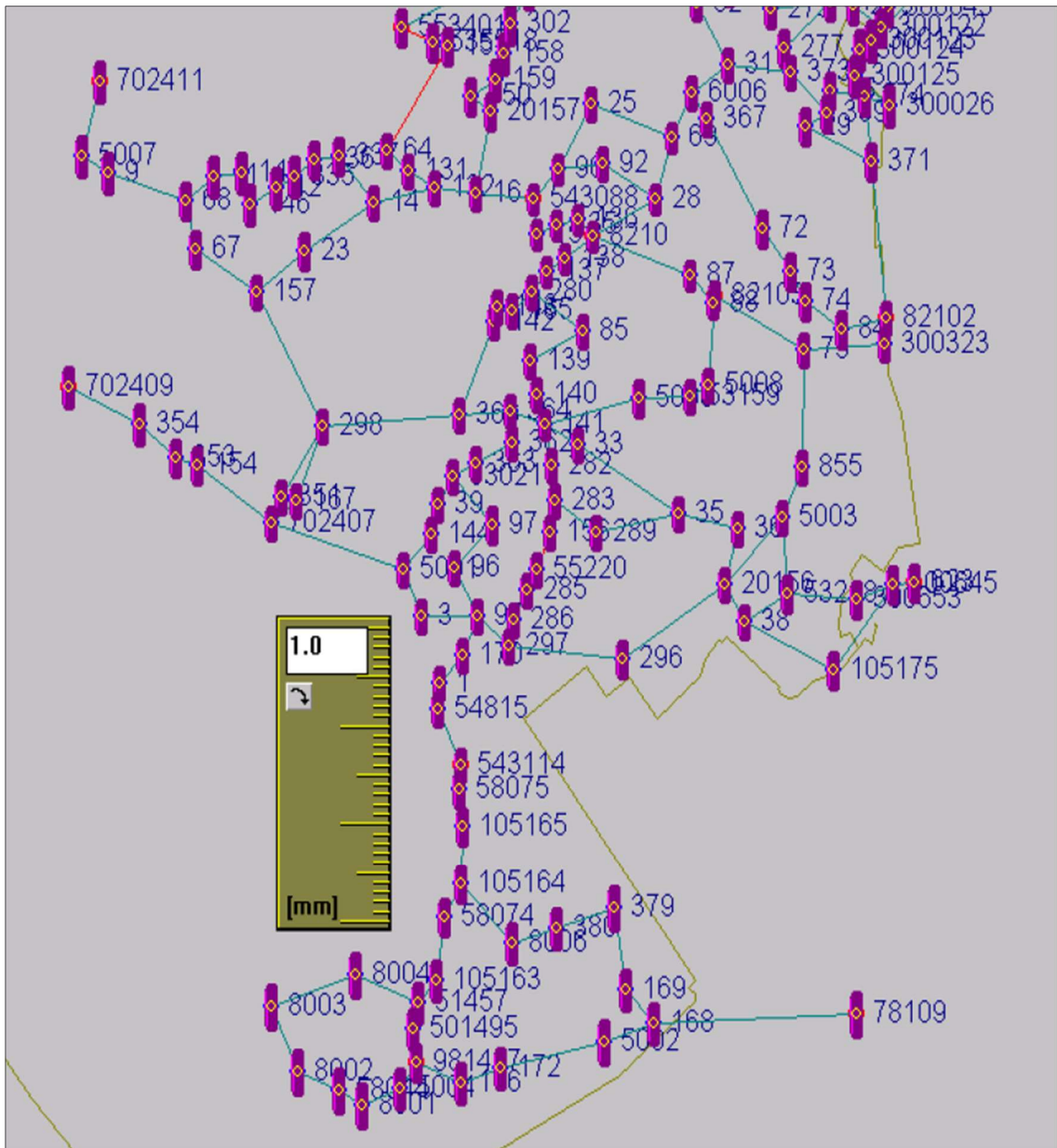
Lopullisen tasoituksen ja tasoitustulosten analysoinnin jälkeen, tasoituksesta tehdään raportti ja sen tulokset dokumentoidaan (Hakala 2016b, 69). Esimerkiksi XPLocal-ohjelma tuottaa huomattavasti enemmän laskentaan liittyviä tietoja kuin mitä mittausten laskenta normaalisti vaatii. Tästä datasta poimitaan tasoituksen tärkeimmät virheiden ja tarkkuuden tunnusluvut. (Laurila 2015, 2.) Tuusulan N2000-hankkeessa tasoituksen tärkeitä tunnuslukuja ovat muun muassa tasoitettu kilometrikeskivirhe ja vaaittujen pisteiden keskimääräinen korkeuskeskivirhe sekä vaaitusverkon suhteellinen tarkkuus. Myös aineiston arkistointi on tärkeää (Hakala 2016b, 69).

4.4.3 Tuusulan N2000-verkon tasoitus

Tuusulan kunnan N2000-tarkkavaaitusverkko jaettiin jo suunnitteluvaiheessa kahteen osaverkkoon, etelä- ja pohjoisverkkoon. Niiden tasoitus suoritettiin erikseen. Kumpaakin verkkoa tasoitettiin mittausten edetessä osissa, jotta karkeat virheet pystyttiin havaitsemaan ja tarvittaessa suorittamaan uusintamittauksia niiden korjaamiseksi. Tarkkavaaituksessa käytettiin Leican DNA03-digivaaituskojetta ja invarviivakoodilattaa, joiden valmistajan kalustolle ilmoittama kilometrikeskivirhe edestakaisessa vaaituksessa on $\pm 0,3 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$. Tuusulan N2000-tarkkavaaitus suoritettiin yhdensuuntaisina vaaituksina, jossa kyseisellä kalustolla on mahdollista päästä melko helposti noin $\pm 1,0\text{--}1,2 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$ kilometrikeskivirheeseen. (Hakala 2015, 3.)

Eteläverkon suljettujen lenkkien sulkuvirheistä arvioitiin sen kilometrikeskivirheen olevan $\pm 1,1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$. Tätä käytettiin myös tasoituksessa verkon painotuksena. Vapaan verkon mukainen tasoitus osoitti verkon korkeushavaintojen sopivan hyvin keskenään yhteen kyseisellä painotuksella. Kiinteän verkon tasoituksessa huomattiin verkon lähtöpisteiden korkeuksissa olevan jonkun verran laadun vaihtelua, joka nosti tasoituksen virhetasoa. Tästä johtuen lopullinen tasoitus laskettiin käyttäen painotettuja lähtöpisteitä, joille annettiin korkeuskeskivirhe $\pm 2,5$ millimetriä. Näin päästiin optimaaliseen tulokseen, jossa korkeushavainnot ja lähtöpisteet ovat hyvässä tasapainossa keskenään. Eteläverkolle suoritettiin myös liitos naapurikaupunki Keravan N2000-verkkoon. (Hakala 2015, 4.)

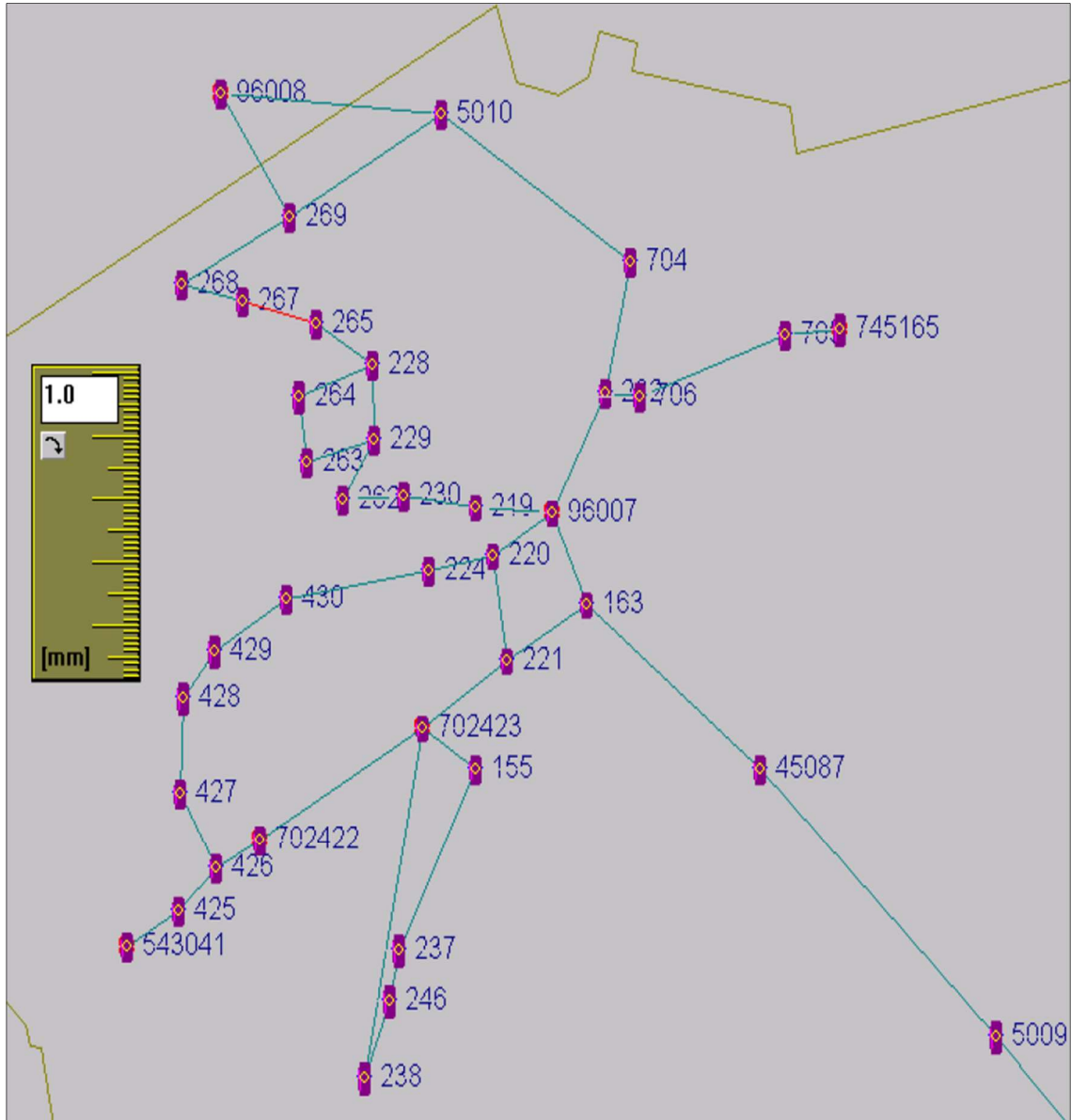
Vaaitusverkon uusien N2000-korkeuspisteiden keskimääräiseksi korkeuskeskivirheeksi saatiin tasoituksessa noin $\pm 1,5$ millimetriä (Kuvio 16). Verkon suhteellisen tarkkuuden keskimääräiseksi arvoksi saatiin 1,9 ppm. (Hakala 2015, 5.) Eteläverkko täyttää Julkisen hallinnon antaman, vaaituksen tarkkuusvaatimuksen $\leq 5 \text{ ppm}$ (JUHTA 2014b).



Kuvio 16. Eteläverkon osan tasoitettujen N2000-pisteiden korkeuskeskivirheet graafisesti esitettynä 68 % todennäköisyyspalkilla (kuvassa olevan mittatikun yksi jakoväli 1 mm) (Hakala 2015, 6)

Samoin kuin eteläverkossakin, myös pohjoisverkossa painotuksena tasoituksessa käytettiin kilometrikeskivirhettä $\pm 1,1 \text{ mm}/\sqrt{\text{km}}$. Vapaan verkon tasoitus sujui ongelmitta. Kytketyn verkon tasoitus suoritettiin painotetuin lähtöpistein samalla tavoin kuin eteläverkossakin, käyttäen korkeuskeskivirhettä $\pm 2,5$ millimetriä. Pohjoisverkon uusien N2000-korkeuspisteiden keskimääräiseksi korkeuskeskivirheeksi (Kuvio 17) ja suhteellisen tarkkuuden keskiarvoksi saatiin samat

$\pm 1,5$ millimetriä ja 1,9 ppm. Pohjoisverkkoon sisältyi liitos naapurikaupunki Järvenpään N2000-korkeusverkkoon. (Hakala 2015, 8–9.)



Kuvio 17. Pohjoisverkon osan tasoitettujen N2000-pisteiden korkeuskeskivirheet graafisesti esitettynä 68 % todennäköisyyspalkilla (kuvassa olevan mittatikun yksi jakoväli 1 mm) (Hakala 2015, 9)

Vaaitusverkossa vaaittavan pisteistön tulee jäädä mahdollisimman hyvin ulommaisten lähtöpisteiden muodostaman monikulmion sisälle ja jokaiselle korkeuslähtöpisteelle on oltava vähintään kaksi korkeuserohavaintoa eli piikkihavaintoja

ei sallita. Tällä tavoin menetellen virheiden kasautuminen verkossa tapahtuu optimaalisella tavalla. Tämä toteutui Tuusulan kunnan N2000-tarkkavaaitusverkossa erittäin hyvin. (Hakala 2015, 2.)

4.5 Vaaitusverkon tasoituslaskennan johtopäätökset

Kun vaaitusverkon tasoitus on saatu valmiiksi ja sen tulokseksi on saatu vaaituille korkeuserohavainnoille tasoitetut korkeudet ja virheet, voidaan arvioida tasoitusprosessin onnistumista sekä tulosten oikeellisuutta ja luotettavuutta. Tällöin tarkastellaan erityisesti vaaituskalustoa ja vaaitusverkon rakennetta sekä vaaituksen tasoituslaskentaosuutta. (Hakala 2014b, 2.)

Mittauskaluston on oltava soveltuva ja tarpeeksi tarkka tarkkavaaituksen tarpeisiin. Käytännössä tämä tarkoittaa digivaaituskojetta ja kiinteää viivakoodilattaa, joka on tehty invarteräksestä. Lisäksi tulee huolehtia, että mittauskalustolle on suoritettu säännöllinen kalibrointi. Vaaitusverkko on rakennettava siten, että se sisältää mahdollisimman paljon lenkkejä ja solmupisteitä. Näin sille saadaan ylimääritystä. Lähtöpisteiden tulisi myös kattaa koko vaaittava alue. (Hakala 2014b, 2.)

Ennen tasoitusta tarkastellaan vaaitusten sulkuvirheitä. Suljettujen lenkkien sulkuvirheistä arvioitu kilometrikeskivirhe antaa paremman kuvan todellista havaintojen kilometrikeskivirheestä, kun lähtöpisteiden vaikutus poistuu. Lisäksi arvioitujen havaintojen kilometrikeskivirheen tulee suurin piirtein vastata vaaituskojeen valmistajan kojeelle ilmoittamaa kilometrikeskivirhettä. Verkkotasoitukselle annetaan painotus arvioitujen kilometrikeskivirheen mukaisesti. (Hakala 2014b, 2.)

Sekä vapaan että kytketyn verkon tasoitettu varianssi tulee olla lähellä a priori varianssikerrointa (1,0). Jos tämä ei toteudu, on painotus määritetty puutteellisesti ja/tai havainnoissa on yksi tai useampi karkea virhe. Tällöin suoritetaan laadullisten jäännösvirheiden standardointi eli data snooping, joka etsii ja paikantaa

karkean virheen sijainnin verkossa. Lisäksi painotuksessa tai verkon lähtöpis-
teissä voi olla virheellisyyksiä, jolloin niitä joudutaan hienosäätämään. Uuden ta-
soitetun korkeuspisteverkon pitää olla itsessään tasalaatuinen sekä istua hyvin
jo olemassa olevaan korkeuskiintopisteverkkoon. (Hakala 2014b, 2.)

Tarkkavaaitusverkon luokittelu perustuu suhteelliseen tarkkuuteen, jonka raja-ar-
von yksikkö on ppm. Suhteellisen virheen tulee olla JHS 185-ohjeiston vaatimus-
ten mukainen. Liian lyhyiden pulttivälien käyttäminen tarkkavaaituksessa voi ai-
heuttaa suhteellisen tarkkuuden raja-arvon ylityksen ja sen vuoksi niiden käyttä-
mistä tulee välttää. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, joten tasoituksen
jälkeisissä yksittäisten välien tulosten tulkinnoissa kannattaa käyttää maalaisjär-
keä. (Hakala 2015, 3.)

5 POHDINTA

Vaaitus on perinteikäs, jo kauan käytössä ollut korkeudenmittausmenetelmä. Sillä saadut korkeuserohavainnot ovat tarkempia kuin esimerkiksi takymetrillä tai satelliittipaikannuksella mitatut korkeudet. Vaaitsemalla mittaaminen on erittäin helppoa ja yksinkertaista, mutta erinomaisiin tuloksiin pääseminen vaatii kuitenkin järjestelmällisyyttä ja huolellisuutta.

Korkeusrunkomittaukset tulisi aina suorittaa tarkkavaaitsemalla, sillä esimerkiksi valtakunnallisen geoidimallin avulla tapahtuva satelliittimittausten korkeudenmuunnos ei ole vaativimpiin tehtäviin tarpeeksi tarkka. Lisäksi korkeusrunkomittauksen vaaitusverkko on tasoitettava tietokoneella, tasoitusohjelmia käyttäen. Tällöin saadaan monipuolisemmat tarkkuus- ja virhearviot kuin muilla tasoitusmenetelmillä.

Tämä opinnäytetyö antaa yleiskatsauksen vaaituksesta yhtenä geodeettisten mittausten menetelmistä. Siinä käsiteltiin korkeutta käsitteenä sekä korkeusjärjestelmiä ja niiden perusteita. Erityisesti keskityttiin Suomessa nykyään ja aikaisemmin käytettyihin korkeusjärjestelmiin. Työssä käsiteltiin myös yleisimmin käytössä olevat vaaituskojeet- ja menetelmät. Lisäksi kerrottiin jonkun verran korkeudenmäärittelyn ja vaaituksen historiaa.

Opinnäytetyön toinen pääaihe oli Tuusulan kunnassa kesällä 2015, suoritettu N2000-tarkkavaaitushanke. Hankkeen tuloksena saatiin kunnalle uusi, tasalaatuinen korkeuspisteverkko, joka liitettiin osaksi valtakunnallista N2000-korkeusjärjestelmää. Tarkkavaaitushanke koostuu vaaitusverkon suunnittelusta, sen mittaamisesta ja saatujen korkeuserohavaintojen tasoittamisesta. Työ antaa lisäksi omakohtaisiin kokemuksiin perustuvan kuvauksen tarkkavaaitushankkeen suorittamisesta mittauksen osalta.

Itselläni oli ennen tämän työn aloittamista kuva vaaituksesta vanhanaikaisena mittausmenetelmänä, jolla ei juurikaan nykyään ole enää käyttöä verrattuna takymetri- ja satelliittipaikannusmittauksiin. Ennakkoluuloni osoittautuivat kuitenkin

vääriksi ja huomasin työtä tehdessäni, että vaaitus on edelleen tärkeä osa geodeettisia mittauksia. Lisäksi opin, että tasoituslaskennalla on suuri merkitys runkomittauksissa.

Työ on hyvä ja selkeä tutkimus siitä, millainen mittausmenetelmä vaaitus on ja kuinka korkeusrunkomittauksen eri vaiheet etenevät. Siinä käytetyt lähteet olen arvioinut luotettaviksi, sillä suurin osa tiedosta on hankittu alan asiantuntijoiden kirjallisuudesta ja muista tuotoksista. Mielestäni tätä opinnäytetyötä voidaan hyödyntää tulevissa, vastaavissa hankkeissa, koska se antaa tarkan kuvauksen prosessin eri vaiheista. Jatkotutkimukselle voisi olla aihetta siinä, miten korkeusrunkopisteiden mittaaminen olisi nopeampaa ja tehokkaampaa ilman korkeuserohavaintojen tarkkuuden merkittävää heikentymistä.

Työn tekeminen oli kokonaisuudessaan erittäin mielenkiintoinen kokemus, huolimatta sen teoriapainotteisuudesta. Opin sitä tehdessäni paljon uusia asioita maanmittausalasta. Tämän työn ansiosta minulla on nyt perustiedot ja – taidot tasoituslaskentaan ja korkeusrunkomittauksiin.

6 LÄHTEET

BBC 2014. History. Building the Great Pyramid. British Broadcasting Corporation. Viitattu 5.2.2016 http://www.bbc.co.uk/history/ancient/egyptians/great_pyramid_01.shtml.

Bilker-Koivula, M. & Ollikainen, M. 2009. Suomen geoidimallit ja niiden käyttäminen korkeuden muunnoksissa. Geodeettinen laitos. Tiedote 29. Viitattu 5.2.2016 <http://www.fgi.fi/fgi/sites/default/files/publications/gltiedote/GLtiedote29.pdf>.

Ferris State University 2016. Surveying and Engineering in Ancient Rome. Ferris State University College of Technology Surveying Engineering. Viitattu 5.2.2016 http://www.surveyhistory.org/ferris_state_university1.htm.

Hakala, J. 2014a. Vaaituksen syvin olemus. Geopixel Oy. Luentomateriaali.

Hakala, J. 2014b. Geodeettisten runkoverkkojen tasoitustulosten yleisarviointi. Geopixel Oy. Luentomateriaali.

Hakala, J. 2015. Tuusulan kunta N2000-tarkkavaaitushanke. Geopixel Oy. Laskentaraaportti.

Hakala, J. 2016a. Koordinaattijärjestelmistä, konversioista ja muunnoksista. Geopixel Oy. Luentomateriaali.

Hakala, J. 2016b. Geodeettisten runkoverkkojen hallinnasta. Geopixel Oy. Luentomateriaali.

Häkli, P., Koivula, H., Poutanen, M. & Puupponen, J. 2009. Suomen geodeettiset koordinaatistot ja niiden väliset muutokset. Geodeettinen laitos. Tiedote 30. Viitattu 5.2.2016 <http://www.fgi.fi/fgi/sites/default/files/publications/gltiedote/GLtiedote30.pdf>.

JUHTA 2008. JHS 163 Suomen korkeusjärjestelmä N2000. Julkisen hallinnon suositukset. Viitattu 5.2.2016 <http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS163/JHS163.pdf>.

JUHTA 2014a. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Julkisen hallinnon suositukset. Viitattu 10.3.2016 <http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS185/JHS185.pdf>.

JUHTA 2014b. JHS 185 Asemakaavan pohjakartan laatiminen. Liite 1 Korkeuskiintopisteiden vaaitseminen. Julkisen hallinnon suositukset. Viitattu 13.4.2016 http://docs.jhs-suositukset.fi/jhs-suositukset/JHS185_liite1/JHS185_liite1.pdf.

Kakkuri, J. 1991. Planeetta Maa. Ursan julkaisuja 42. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa.

Kallio, U. 1998. Tasoituslasku. Helsinki: Tekijä ja Oy Yliopistokustannus/Otatieto.

Laurila, P. 2007. Pienimmän neliösumman menetelmä. Rovaniemen ammattikorkeakoulu. Luentomateriaali.

Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. 4. uudistettu painos. Jyväskylä: Kopijyvä Oy.

Laurila, P. 2015. Vaaitusten laskenta XPLocal-ohjelmalla. Lapin ammattikorkeakoulu. Luentomateriaali.

Maanmittauslaitos 2016a. N2000 Valtakunnallinen korkeusjärjestelmä. Viitattu 5.2.2016 http://www.maanmittauslaitos.fi/sites/default/files/N2000_Valtakunnallinen_korkeusjarjestelma.pdf.

Maanmittauslaitos 2016b. Kiintopistemittaus. Viitattu 10.3.2016 <http://www.maanmittauslaitos.fi/ammattilaisille/maastotiedot/koordinaatti-korkeusjarjestelmat/etrs89-euref-fin/kiintopisteet/kiintopistemittaus>.

Merlin Lazer 2016. Leica NA 720 Automatic Optical Builders Level KIT. Survey Instruments. Viitattu 10.3.2016 <http://www.merlinlazer.com/Leica-NA-720-Automatic-Optical-Builders-Level-KIT-Includes-NA720-Level-Tripod-Levelling-Staff>.

NOAA 2007. Level Headed: A Brief History of Leveling at the National Geodetic Survey. The Early History of Leveling. National Oceanic and Atmospheric Administration. Viitattu 5.2.2016 <http://celebrating200years.noaa.gov/foundations/leveling/welcome.html#early>.

Paikkatietokeskus 2016a. Teematietoa. Geoidi. Viitattu 5.2.2016 <http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/geoidi>.

Paikkatietokeskus 2016b. Strategiset osaamisalueet. Referenssijärjestelmät. Viitattu 12.4.2016 <http://www.fgi.fi/fgi/fi/me/osaamisalueet/referenssij%C3%A4rjestelm%C3%A4t>.

Paikkatietokeskus 2016c. Teematietoa. Maannousu. Viitattu 5.2.2016 <http://www.fgi.fi/fgi/fi/teemat/maannousu>.

Price, B. & Uren, J. 2010. Surveying for Engineers. 5th Edition. New York, NY: Palgrave Macmillan.

Päivänen, J. 2010. Maanmittauksen pitkä historia. Metsätieteen aikakauskirja 1/2010. Viitattu 5.2.2016 <http://www.metla.fi/aikakauskirja/full/ff10/ff101084.pdf>.

Trustees of Dartmouth College 2016. Dartmouth Engineer Magazine. Invisible Hands of Science. Viitattu 14.4.2016 <http://engineering.dartmouth.edu/magazine/invisible-hands-of-science/>.

Tuusulan kunta 2013a. Tietoa Tuusulasta. Viitattu 5.2.2016 https://www.tuusula.fi/index.tml?sivu_id=1016.

Tuusulan kunta 2013b. Tuusulan keskukset. Viitattu 5.2.2016 https://www.tuusula.fi/sivu.tmpl?sivu_id=1239.

Vermeer, M. 2006. Korkeuden lyhyt historia. Viitattu 5.2.2016 <http://www.kolumbus.fi/eino.uikkanen/korkeuspv/k-paivat.pdf>.

Vermeer, M. 2015. Geodesia. Samizdat kustannus Oy. Viitattu 10.3.2016 <https://users.aalto.fi/~mvermeer/geobook.pdf>.

X-Position 1998. Local X-Positioning System. Käyttöohje.